



Tânia Isabel Dias Salcedas

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Evolução da condição de vias-férreas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Urbanismo e Transportes

Orientador: Doutor André Luís Marques Paixão, Bolseiro de
Pós-Doutoramento do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Coorientadora: Doutora Simona Fontul, Professora Auxiliar
Convidada da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professora Doutora Zuzana Dimitrovová
Arguente: Professor Doutor José Nuno Varandas Ferreira
Vogal: Professora Doutora Simona Fontul



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro 2016

Evolução da condição de vias-férreas

Copyright © Tânia Isabel Dias Salcedas, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Para atingir este passo na minha vida académica, quero expressar os meus agradecimentos:

Ao meu orientador, Doutor André Paixão, por todo o tempo dispensado para me ajudar a trabalhar com o MATLAB, por estar sempre disponível para o esclarecimento de qualquer dúvida, por todas as ideias de trabalho que surgiram ao longo das conversas, por toda a exigência compensada pela dissertação presente e pelo apoio dado ao longo da mesma.

À minha coorientadora e Professora Doutora Simona Fontul, por me apresentar um bocadinho do mundo das ferrovias nas suas aulas, por toda a disponibilidade, ajuda e a encorajamento em muitos dos momentos para a realização desta dissertação.

Aos meus pais, por toda a paciência, confiança, apoio e possibilidade financeira pois sem eles não teria chegado até aqui.

Ao meu marido, por todo o apoio e força que me tem dado, pela confiança depositada em mim, pela exibição de outros pontos de vista e por tudo o resto.

À minha amiga Sara, que esteve presente em muitas fases deste percurso académico, sempre disponível em ajudar.

A todos os colegas e amigos que me marcaram durante todo o meu percurso académico e que de uma forma ou de outra me ajudaram a ultrapassar os obstáculos que foram surgindo.

Resumo

A presente dissertação pretende ser um contributo para o desenvolvimento de uma metodologia de análise de dados resultantes de inspeções realizadas por veículos de auscultação dinâmica em vias férreas da rede nacional e que pode contribuir para o aumento da eficiência das atividades de gestão de infraestruturas. A metodologia proposta apresenta uma avaliação geral de todos os parâmetros geométricos, dando uma maior relevância ao nivelamento longitudinal e ao alinhamento, parâmetros considerados determinantes para a classificação da qualidade da via e avaliação da necessidade de manutenção através da realização do ataque mecânico pesado.

É utilizado como caso de estudo um trecho de uma via-férrea para aplicação do método proposto. São avaliados os parâmetros geométricos da via e a mesma é caracterizada quanto à sua classe de qualidade geométrica, de acordo com a série de normativos europeus EN 13848, tendo em conta a gama de velocidades máxima praticada. Os resultados de campanhas de auscultação obtidos em diferentes períodos sobre esse trecho são submetidos a um pós-processamento que inclui, entre outros aspetos, o alinhamento quilométrico entre as diferentes campanhas e o cálculo do desvio padrão de parâmetros geométricos utilizando janelas móveis de diferentes comprimentos, possibilitando uma avaliação mais detalhada da influência da presença de algumas singularidades (ou eventos), como sendo as pontes, túneis, passagens inferiores, atravessamentos pedonais não autorizados, entre outras.

No âmbito deste estudo foi avaliada também a evolução da qualidade geométrica da via. Em geral, o método adotado evidencia uma evolução gradual de degradação da qualidade geométrica que é característica deste tipo de estruturas. No entanto, na generalidade dos casos, ficou demonstrado que a degradação de qualidade geométrica é notoriamente mais rápida nos trechos de via onde se encontram singularidades. Este comportamento da infraestrutura ferroviária sugere que tais locais críticos da via-férrea sejam alvo de um acompanhamento mais cuidado no âmbito das atividades de gestão de ativos com vista a se poder maximizar a vida útil da estrutura e dos seus componentes. Nesse sentido, a análise da evolução da qualidade da via-férrea nas singularidades poderá ser considerada de um modo mais detalhado do que a avaliação em plena via e, conseqüentemente, também a programação de medidas de manutenção.

Palavras – chave: via-férrea, qualidade geométrica da via-férrea, nivelamento longitudinal, alinhamento, singularidades da via-férrea, taxa de degradação.

Abstract

The present dissertation intends to contribute to the development of a methodology for the analysis of data resulting from inspections carried out by vehicles of dynamic auscultation in the railways of the national network and that can contribute to the increase of the efficiency of the activities of management of infrastructures. The proposed methodology presents a general evaluation of all geometric parameters, giving more relevance to longitudinal leveling and alignment, parameters considered determinant for the classification of the quality of the track and maintenance through heavy mechanical attack.

It is used as a case study an excerpt from a railway to apply the proposed method. The geometrical parameters of the track are evaluated and it is characterized by its geometric quality class according to the European Standard EN 13848, taking into account the maximum speed range practiced. The results of auscultation campaigns obtained in different periods on this stretch are subjected to a post-processing that includes, among other aspects, the kilometer alignment between the different campaigns and the calculation of the standard deviation of geometric parameters using mobile windows of different lengths, Allowing for a more detailed evaluation of the influence of the presence of some singularities (or events), such as bridges, tunnels, lower passages, unauthorized pedestrian crossings, among others.

In this study the evolution of the geometric quality of the track was also evaluated. In general, the adopted method evidences a gradual evolution of the degradation of the geometric quality that is characteristic of this type of structures. However, in most cases, it has been demonstrated that the degradation of geometric quality is notoriously faster in the track sections where singularities are found. This behavior of railway infrastructure suggests that such critical railway sites should be monitored more carefully in asset management activities in order to maximize the useful life of the structure and its components. In this sense, the analysis of the evolution of the quality of the railway in the singularities can be considered in a more detailed way than the evaluation in full track and, consequently, also the programming of maintenance measures.

Keywords: railway, track geometry quality, longitudinal leveling, alignment, railway singularities, degradation rate.

Índice

1. Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Principais contribuições e resultados esperados	2
1.4 Organização da dissertação	3
2. Via-férrea: Estrutura, Comportamento e Degradação	5
2.1 Aspetos gerais da estrutura e comportamento da via-férrea balastrada.....	5
2.2 Degradação da qualidade da via-férrea	8
3. Qualidade Geométrica da via-férrea	13
3.1 Inspeção da Via-férrea	13
3.2 Parâmetros geométricos avaliados.....	14
3.3 Avaliação da qualidade de via	21
3.4 Veículos de Inspeção de Via-férrea.....	23
4. Metodologias para a análise de evolução das condições das vias-férreas.....	27
4.1 Metodologia existente	27
4.2 Metodologia proposta.....	29
5. Caso de Estudo	32
5.1 Caracterização da via-férrea	32
5.2 Dados analisados.....	37
5.3 Resultados	38
5.3.1 Avaliação geral dos parâmetros geométricos.....	40
5.3.2 Avaliação do estado da via relativamente ao nível de tolerância de alerta.....	44
5.3.3 Avaliação da qualidade geométrica em termos de distribuição estatística.....	47
5.3.4 Evolução da condição de via ao longo de todo o troço da via-férrea.....	59
5.3.5 Evolução da condição de via ao longo das singularidades.....	65
5.4 Cálculo das taxas de variação anual	68
5.4.1 Taxa de variação anual para toda a via.....	68
5.4.2 Taxas de variação anual nas singularidades.....	71
5.5 Síntese da análise de resultados	76
6. Conclusões e Desenvolvimentos futuros.....	79
6.1 Conclusões.....	79

6.2	Desenvolvimentos futuros	82
Referências Bibliográficas		85
Anexo A		87
Anexo B		91
Anexo C		95
Anexo D		101

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Esquema estrutural de uma via balastrada em curva [adaptado de UIC, 2008]	5
Figura 2.2 – Processo normal de degradação da qualidade geométrica da via [adaptado de Paixão, 2014].....	8
Figura 3.1 - Bitola [IT.VIA.018, 2009]	15
Figura 3.2 – Esquema do defeito relativo ao nivelamento longitudinal: efeito de galope nos veículos	15
Figura 3.3 - Nivelamento transversal [IT.VIA.018, 2009]	16
Figura 3.4 – Alinhamento longitudinal [Rodrigues, 2012]	16
Figura 3.5 - Empeno.....	17
Figura 3.6 - VIV - EM-120 [Paixão, 2014]	24
Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia proposta	31
Figura 5.1 - Distribuição do carril e travessas na via-férrea em análise	33
Figura 5.2 - Imagens ilustrativas do tipo de singularidades estudadas	36
Figura 5.3 – Traçado esquemático do trecho e posições relativas das singularidades assinaladas.....	36
Figura 5.4 – Mapa com velocidades máximas de circulação permitidas no troço em análise (em km/h).....	39
Figura 5.5 - Gráfico que relaciona as velocidades máximas de circulação permitidas com Pk's	39
Figura 5.6 - Parâmetros geométricos e desvio padrão do LL e AL entre o Pk 0 e Pk 25.....	41
Figura 5.7 - Parâmetros geométricos e desvio padrão do LL e AL entre o Pk 25 e Pk 50	42
Figura 5.8 - Mapa com valores do registo da EM120 relativamente ao LL_{D1}^{Dir} , em Março de 2012 e Março de 2016	42
Figura 5.9 - Mapa com valores do registo da EM120 relativamente ao LL_{D1}^{Esq} , em Março de 2012 e Março de 2016	43
Figura 5.10 - Mapa com valores do registo da EM120 relativamente ao AL_{D1}^{Dir} , em Março de 2012 e Março de 2016	43
Figura 5.11 - Mapa com valores do registo da EM120 relativamente ao AL_{D1}^{Esq} , em Março de 2012 e Março de 2016	44
Figura 5.12 – Mapa com localização dos pontos acima do valor de tolerância de alerta para o $SD_{LL,D1}$, a) em Março de 2012, b) em Novembro de 2012 e c) em Março de 2016.....	46
Figura 5.13 – Mapa com localização dos pontos acima do valor de tolerância de alerta para o $SD_{AL,D1}$, a) em Março de 2012, b) em Novembro de 2012 e c) em Março de 2016.....	47
Figura 5.14 - Distribuição Acumulada do $SD_{LL,D1}$ das campanhas de Março de 2012 e Março de 2016, de acordo com as velocidades máximas permitidas no percurso, segundo a EN13848-6	49

Figura 5.15 - Distribuição Acumulada do $SD_{AL,D1}$ das campanhas de Março de 2012 e Março de 2016, de acordo com as velocidades máximas permitidas no percurso, segundo a EN13848-6	52
Figura 5.16 - Distribuição das classe de qualidade de via (EN 13848-6) relativamente ao valor médio do desvio padrão do LL_{D1} segundo as gamas de velocidades	55
Figura 5.17 - Distribuição das classe de qualidade de via (EN 13848-6) relativamente ao valor médio do desvio padrão do AL_{D1} segundo as gamas de velocidades	56
Figura 5.18 – Mapa com a classificação da qualidade geométrica para o LL_{D1} , em cada campanha, segundo a EN 13848	57
Figura 5.19 – Mapa com a classificação da qualidade geométrica para o AL_{D1} , em cada campanha segundo a EN 13848	58
Figura 5.20 - Evolução do $SD_{LL,D1}$ para um desvio padrão de 200m, a) entre o Pk 0 e o Pk 25 e b) entre o Pk 25 e o Pk 48	60
Figura 5.21 – Diagramas de caixa para a) Valores de $SD_{LL,D1}$ de cada campanha e b) Diferenças entre os valores $SD_{LL,D1}$ entre campanhas sucessivas (em mm)	61
Figura 5.22 - Desvio padrão com janela de 200 metros	62
Figura 5.23 - Comparação do desvio padrão utilizando os dois métodos de cálculo com janelas de 200 metros da campanha de março de 2012	63
Figura 5.24 - Comparação do desvio padrão utilizando os dois métodos de cálculo com janelas de 200 metros para as três campanhas	63
Figura 5.25 – Evolução do valor médio do desvio padrão para a) janela móvel de 200 metros e b) janela móvel para 75 metros	65
Figura 5.26 - Desvio padrão nas singularidades comparado com a média, consoante a velocidade, em março de 2012	67
Figura 5.27 - Desvio padrão nas singularidades comparado com a média, consoante a velocidade, em março de 2016	67
Figura 5.28 – Diagramas de caixa tendo em conta a) Toda a extensão da via-férrea e b) Trecho da via-férrea com desenvolvimento semelhante ao longo das campanhas	69
Figura 5.29 – Trecho da via-férrea com desenvolvimento semelhante do LL_{D1} ao longo das campanhas	70
Figura 5.30 – Taxa de variação anual	71
Figura 5.31 - Média da taxa de variação anual, em mm/ano, para as duas gamas de velocidades e o valor das taxas em cada uma das singularidades, entre as campanhas de março de 2016 e março de 2012	72
Figura 5.32 – Taxa de variação anual para cada singularidade	73
Figura 5.33 – Diagrama de caixa para todas as singularidades	75
Figura A.1 – Localização de estações	87
Figura A.2 – Localização de passagens inferiores	87
Figura A.3 – Localização de passagens de nível abertas ao trânsito e encerradas e atravessamentos pedonais não autorizados	88

Figura A.4 – Localização de pontes	88
Figura A.5 – Localização de passagens superiores	89
Figura A.6 – Localização de túneis	89
Figura B.1 - Parâmetros geométricos e desvio padrão do LL e AL entre o Pk 0 e Pk 10	91
Figura B.2 - Parâmetros geométricos e desvio padrão do LL e AL entre o Pk 10 e Pk 20	91
Figura B.3 - Parâmetros geométricos e desvio padrão do LL e AL entre o Pk 20 e Pk 30	92
Figura B.4 - Parâmetros geométricos e desvio padrão do LL e AL entre o Pk 30 e Pk 40	92
Figura B.5 - Parâmetros geométricos e desvio padrão do LL e AL entre o Pk 40 e Pk 50	93
Figura C.1 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 0 e 10.....	95
Figura C.2 – Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 10 e 20.....	95
Figura C.3 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 20 e 30.....	96
Figura C.4 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 30 e 40.....	96
Figura C.5 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 40 e 50.....	97
Figura C.6 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 0 e Pk 10	97
Figura C.7 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 10 e Pk 20	98
Figura C.8 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 20 e Pk 30	98
Figura C.9 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 30 e Pk 40	99
Figura C.10 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 40 e Pk 48	99
Figura D.1 – Taxa de variação anual entre março de 2012 e março de 2016	101
Figura D.2 – Taxa de variação anual entre março de 2012 e março de 2016	101
Figura D.3 – Taxa de variação anual entre março de 2012 e março de 2016	102
Figura D.4 – Taxa de variação anual entre março de 2012 e março de 2016	102
Figura D.5 – Taxa de variação anual entre março de 2012 e março de 2016	103

Índice de Quadros

Quadro 3.1 - Tipos de irregularidades ou defeitos pontuais da via, das rodas do veículo e do carril.....	17
Quadro 3.2 - Tolerância de alerta, em milímetros, para linhas de bitola de 1668 mm e 1435 mm	18
Quadro 3.3 - Tolerância de intervenção, em milímetros, para linhas de bitola de 1668 mm e 1435 mm.....	19
Quadro 3.4 - Tolerância de ação imediata, em milímetros, para linhas de bitola de 1668 mm e 1435 mm.....	19
Quadro 3.5 - Tolerância de alerta do desvio padrão para linhas de bitola 1668mm e 1435mm 20	
Quadro 3.6 - Valores de referência para definir intervalos de limite de alerta para o $SD_{LL,D1}$	20
Quadro 3.7 - Valores de referência para definir intervalos de limite de alerta para o $SD_{AL,D1}$	20
Quadro 3.8 - Níveis de Qualidade Geométrica da via-férrea [Fontul, 2015]	22
Quadro 3.9 - Classe da qualidade de via para o nivelamento longitudinal D1	23

Quadro 3.10 – Classe da qualidade de via para o alinhamento D1	23
Quadro 4.1 - Critério para classificação da geometria de via	28
Quadro 5.1 - Tipos e respetiva contabilização das singularidades.....	34
Quadro 5.2 – Resumo das características relativas à gama de velocidades	39
Quadro 5.3 - Quadro-resumo sobre os gráficos de distribuição acumulada do $SD_{LL,D1}$	51
Quadro 5.4 - Quadro-resumo sobre os gráficos de distribuição acumulada do $SD_{AL,D1}$	53
Quadro 5.5 - Percentagem da via-férrea associada a cada classe de qualidade de via para o $SD_{LL,D1}$	54
Quadro 5.6 - Percentagem da via-férrea associada a cada classe de qualidade de via para o $SD_{AL,D1}$	54
Quadro 5.7– Informação do diagrama de caixa para os valores de $SD_{LL,D1}$ de cada campanha	61
Quadro 5.8 - Informação do diagrama de caixa para a diferença entre os valores de $SD_{LL,D1}$ entre campanhas sucessivas	61
Quadro 5.9 - Média do valor médio do desvio padrão para o LL_{D1} (mm)	64
Quadro 5.10 – Taxa de variação anual do $SD_{LL,D1}$	68
Quadro 5.11 – Informação do diagrama de caixa para toda a extensão da via	70
Quadro 5.12 – Informação do diagrama de caixa para um trecho da via (Pk 27 a Pk 40)	70
Quadro 5.13 - Informação do diagrama de caixa para cada singularidade (TVA em mm/ano) .	74
Quadro 5.14 - Informação do diagrama de caixa considerando todas as singularidades (TVA em mm/ano)	75
Quadro 5.15 – Síntese da análise de resultados	76

Simbologia

AL	Alinhamento (<i>Alignment</i>)
AP _{NA}	Atravessamento Pedonal não autorizado
D1	Gama de comprimentos de onda: $3\text{ m} < \lambda \leq 25\text{ m}$
D2	Gama de comprimentos de onda: $25\text{ m} < \lambda \leq 70\text{ m}$
IP	Infraestruturas de Portugal, S.A.
LA	Limite de Alerta
LAI	Limite de Ação Imediata
LI	Limite de Intervenção
LL	Nivelamento longitudinal (<i>Longitudinal level</i>)
PI	Passagem inferior
Pk	Ponto quilométrico
PN	Passagem de nível
PN _e	Passagem de nível encerrada
PS	Passagem superior
QN	Nível de qualidade geométrica
RIV	Renovação Integral da Via
SD	Desvio padrão (<i>Standard Deviation</i>)
\overline{SD}	Valor médio do desvio padrão
$\overline{SD}_{AL,D1}$	Valor médio do desvio padrão do alinhamento D1 do carril esquerdo e direito
$\overline{SD}_{LL,D1}$	Valor médio do desvio padrão do nivelamento longitudinal D1 do carril esquerdo e direito
TQI	Índice de Qualidade Geométrica (Track Quality Index)
TVA	Taxa de variação anual
UIC	União Internacional dos Caminhos-de-ferro (<i>Union Internationale des Chemins de fer</i>)
VIV	Veículo de Inspeção de Via

Capítulo 1

1. Introdução

1.1 Enquadramento

A presente dissertação consistiu em estudar a evolução no tempo das condições da via-férrea, em particular a sua qualidade geométrica, em função das características da infraestrutura e da presença ou não de singularidades de via, também designadas de “eventos” na terminologia ferroviária.

Sendo que a geometria da via é um indicador importante da condição da via, principalmente em vias balastradas, para a aplicação do método e das ferramentas desenvolvidas no estudo dessa evolução, foi possível utilizar, como caso de estudo, um trecho de via-férrea sobre o qual têm sido registados, em campanhas periódicas, vários parâmetros de geometria de via recorrendo a um veículo de auscultação designado de EM120. Posteriormente, é feita a interpretação da evolução dos parâmetros geométricos diretamente ligados à manutenção da via, como nivelamento longitudinal e alinhamento longitudinal onde será analisada a evolução dos parâmetros e a influência de eventos ao longo do traçado ferroviário na evolução dos parâmetros de via.

Com o intuito de utilizar algumas ferramentas que normalmente não são utilizadas na análise dos dados registados pela EM120, surge a possibilidade de recorrer ao MATLAB, um software interativo utilizado com muita frequência para a resolução de problemas numéricos, que utiliza uma linguagem própria de programação. Recorre-se a esta ferramenta pois, em comparação com as ferramentas tradicionais possibilita, entre outros, a capacidade de trabalhar com um valor considerável de dados em simultâneo; permite um maior controlo na visualização dos resultados obtidos e, no caso presente, permite localizar e visualizar geograficamente cada valor obtido nas campanhas de auscultação de geometria de via, havendo também a hipótese de cruzar dados obtidos em campanhas sucessivas ou qualquer outro tipo de característica da via-férrea.

Neste trabalho, após o processamento inicial dos dados obtidos, é realizada uma avaliação geral da evolução de três campanhas de auscultação, principalmente focada em dois dos principais parâmetros considerados nos normativos em vigor, nomeadamente, o nivelamento longitudinal e o alinhamento longitudinal. É realizada uma análise mais detalhada dos trechos de via onde se encontram singularidades, como sendo, pontes, túneis, passagens de nível, passagens inferiores, entre outros.

Posteriormente, é avaliada a taxa de evolução de alguns parâmetros geométricos entre campanhas sucessivas, é tido em conta a via-férrea na sua totalidade e apenas as zonas onde existem as singularidades. Por fim, compara-se as taxas de evolução específicas com as gerais, com vista a avaliar a influência da presença de singularidades no comportamento de longo prazo da infraestrutura.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho visa estudar a evolução das condições da via-férrea, em particular a sua qualidade geométrica, utilizando métodos e ferramentas mais complexas e com maiores potencialidades do que aquelas usualmente utilizadas para a análise corrente deste tipo de informação produzida por veículos de auscultação de geometria de via. Pretende-se também confirmar que a evolução da degradação, onde estão localizadas as singularidades, é superior à evolução observada ao longo da via.

1.3 Principais contribuições e resultados esperados

Pretende-se contribuir para uma melhor compreensão da evolução da qualidade geométrica de vias-férreas, estudando a influência que distintas características da infraestrutura possam ter para esse comportamento de longo prazo.

Espera-se que a abordagem apresentada neste trabalho possa contribuir para aumentar a eficiência das atividades de gestão de ativos das gestoras de infraestruturas ferroviárias, possibilitando identificar e corrigir mais precocemente situações críticas na infraestrutura, contribuindo para uma melhor calendarização de intervenções e, assim, reduzindo esforços de manutenção e reabilitação da via, bem como eventuais restrições de velocidades ou até de circulações.

1.4 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos.

No capítulo 1, “Introdução”, apresentam-se algumas noções gerais sobre o trabalho presente, enumeram-se os objetivos propostos para o mesmo e define-se as metodologias e a organização geral da dissertação.

No capítulo 2, “Via-férrea: Estrutura, Comportamento e Degradação”, evidencia-se a estrutura da via-férrea, desde a sua constituição até às funções de cada constituinte da via, o comportamento da via-férrea relativamente à presença de certo tipo de singularidades e comportamento em geral nas diferentes ações na via-férrea e a que tipo de degradação, uma via-férrea está sujeita durante a sua via útil.

No capítulo 3, “Qualidade Geométrica da via-férrea”, refere-se ao tipo de inspeções que uma via-férrea pode ser sujeita, descreve-se os parâmetros geométricos avaliados e possíveis defeitos ou irregularidades que possam ocorrer, os valores limite de tolerância para intervenção da via, tabelas das normas para valores de referência de desvio padrão e classes de qualidade da via.

No capítulo 4, “Metodologias”, são expostas duas visões, a metodologia existente que está em vigor e a metodologia proposta onde se apresenta uma nova forma de analisar a evolução da via-férrea.

No capítulo 5, “Caso de estudo”, são apresentadas as características do trecho de via-férrea em estudo, os dados a serem avaliados e, por último, são apresentados os resultados, em forma de figuras com gráficos e quadros.

No capítulo 6, “Conclusões e Desenvolvimentos futuros”, são expostas as conclusões que se obtiveram aquando da análise da evolução das diversas campanhas e tecem-se algumas considerações sobre possíveis desenvolvimentos e melhorias a realizar no futuro.

Capítulo 2

2. Via-férrea: Estrutura, Comportamento e Degradação

2.1 Aspectos gerais da estrutura e comportamento da via-férrea balastrada

Existem três principais tipos de estrutura de via-férrea: via balastrada, via em placa e via de apoio misto (por exemplo, com uma camada de betuminoso). A via balastrada (Figura 2.1) tem na superestrutura uma camada de balastro, geralmente apoiada sobre uma camada de sub-balastro colocada no topo da subestrutura. Já a via em placa tem como principal parte estrutural, uma laje em betão ou de mistura betuminosa, em substituição da camada de balastro, assente sobre uma camada de betão pobre. Por último, a via de apoio misto tem a camada de balastro da superestrutura assente sobre uma camada de sub-balastro em misturas betuminosas, solução utilizada nas linhas de alta velocidade de Itália.

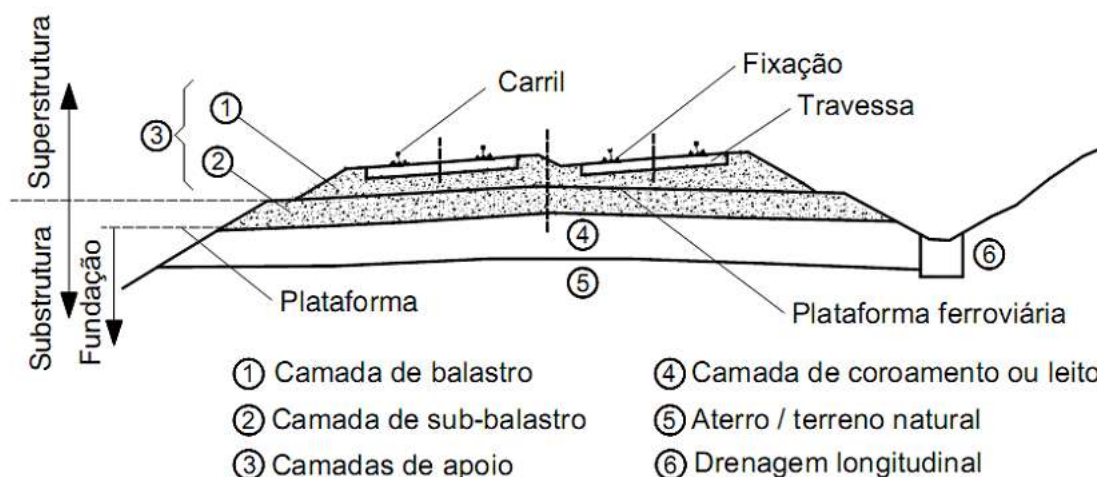


Figura 2.1 – Esquema estrutural de uma via balastrada em curva [adaptado de UIC, 2008]

A via-férrea balastrada - o tipo de via que vai ser analisada neste estudo - é a mais generalizada ao nível nacional e mundial. Como apresentado na Figura 2.1, a superestrutura da via é constituída pelo armamento da via, nomeadamente as travessas, os carris, as palmilhas de carril, e as fixações, e pela camada de balastro. A subestrutura da via balastrada é geralmente constituída pela camada de sub-balastro, camada de coroamento e pelo solo de fundação em aterro ou escavação.

Cada constituinte da estrutura da via-férrea tem de atender a determinadas características estabelecidas em normativos específicos e garantir o bom funcionamento de acordo com as suas distintas funções, referidas em seguida.

O topo da subestrutura, sendo ou o topo da camada de sub-balastro ou a plataforma natural em vias mais antigas, tem de ser plano e ter inclinação transversal suficiente de modo a facilitar a drenagem, tem de resistir à passagem do tráfego durante a construção e ser bem isolada para impedir possíveis infiltrações.

A camada de balastro, constituída por material granular natural, tem de promover uma distribuição homogénea das forças sobre a subestrutura, possuir uma resistência longitudinal e lateral elevada para a armadura da via, garantir uma boa drenagem da água, garantir a elasticidade da via com a finalidade de amortecer as cargas dinâmicas e permitir uma fácil correção da posição da via atrás da sua alteração (trabalhos de ataque e ripagem) [Fontul, 2015] .

O agregado de balastro tem ainda de possuir determinadas características físicas e mecânicas definidas em normativos específicos, como a granulometria, a forma das partículas do balastro (índice de achatamento, índice de forma e comprimento) e a resistência mecânica baseada nos ensaios de desgaste de Los Angeles e Micro-Deval.

As travessas têm como funções principais distribuir as cargas verticais e horizontais provenientes dos carris sobre o balastro, fixar os carris e manter a bitola da via.

O carril tem de resistir às cargas induzidas pelo tráfego e transmitir as cargas aos outros elementos da via, servir de guia aos rodados dos comboios e pode até conduzir energia elétrica, não é comum, em Portugal, pois a catenária destina-se a essa distribuição de energia, diminuindo assim possíveis casos de eletrocussão.

As fixações do carril têm como funções, como o próprio nome indica, fixar os carris à travessa, impedindo o seu deslizamento e estabelecer a bitola da via.

Os elementos que constituem o armamento da superestrutura podem ser de diversos tipos e formas: as travessas podem ser de diferentes materiais, em madeira, betão (monobloco ou bibloco) ou metálicas e consoante a via podem ser longarinas, travessas em escada ou em Y; o carril pode ser uma via de barras com juntas ou então uma barra longa soldada (BLS), pode

ter ainda várias formas: simétrico, de gola (phoenix), *bull head* ou *vignole* dependo da finalidade da via; As fixações do carril podem ser rígidas ou flexíveis [Esveld, 2001].

Em Portugal, as ferrovias existentes são, na sua maioria, consideradas vias de tráfego misto pois nelas circulam material circulante de passageiros e de mercadorias, necessitando assim de mais atenção no seu comportamento, uma vez que quando se procede à reparação de algum troço, as ligações ficam interrompidas, prejudicando a deslocação de passageiros e mercadorias.

O período de vida útil de uma via balastrada é de 30 anos, no máximo, dependendo do tráfego, sendo necessária a sua renovação passado esse prazo. Os trabalhos de conservação, renovação e reabilitação são frequentes e existe a necessidade de renovação intercalar de alguns elementos com menor período de vida útil. A via balastrada, quando comparada com outras tipologias de via-férrea, apresenta uma menor uniformidade da rigidez vertical ao longo do seu desenvolvimento, tem uma estabilidade transversal limitada devido às propriedades mecânicas do balastro na interface com as travessas. Por outro lado, a utilização de balastro na via concede uma boa absorção acústica e beneficia de um contributo positivo das propriedades mecânicas resilientes do balastro [Paixão e Fortunato, 2009].

Tendo em vista a obter estruturas que exibam um elevado desempenho, há que planear vias com menores custos de manutenção, melhor qualidade de serviço para os utilizadores e mais amigas do ambiente, sendo necessário desenvolver processos de garantia da qualidade, que imponham procedimentos adequados nas diversas fases da vida das obras, nomeadamente durante a conceção, a construção e a operação.

O comportamento da via-férrea ao longo da sua vida útil depende de vários fatores e da combinação de diversos deles, nomeadamente:

- Qualidade de construção da via face às características do tráfego – qualidade inicial ou intrínseca, que depende das características de cada um dos componentes e do sistema global (superestrutura e subestrutura);
- Geometria da via;
- Política de conservação, de reabilitação e de renovação;
- Tolerâncias e desvios admissíveis, estabelecidos em função dos tipos de tráfego;
- Quantidade e tipo de tráfego, incluindo fatores característicos da interação roda/carril.

Todos estes fatores contribuem para a variação do estado da via e para o seu desempenho a longo prazo [Fortunato, 2005].

2.2 Degradação da qualidade da via-férrea

A degradação da qualidade geométrica da via-férrea é um fator muito importante na avaliação do desempenho da mesma. Assim, é necessário que a análise da via-férrea seja feita de forma correta e antecipadamente de modo a evitar problemas acrescidos [Cerdeiral, 2014].

Considerando uma situação ideal para a exploração ferroviária do ponto de vista da otimização de custos de manutenção, onde o trecho da via-férrea a considerar é em linha reta, com uma geometria inicial sem defeitos, com camadas uniformes em todo o seu comprimento e veículos com rodados sem defeitos, o comportamento esperado seria um desgaste e uma degradação uniformes ao longo da sua extensão; assim, a via iria assentar uniformemente ao invés de formar irregularidades localizadas no posicionamento dos carris [Paixão, 2014].

Contudo, na realidade nunca se verificam as situações ideais pois existem sempre diferentes condições de apoio, os materiais aplicados na via-férrea, embora cumprindo as normas, não têm sempre as mesmas características, existem sempre pequenas imperfeições no posicionamento dos carris e as cargas dinâmicas exercidas pelos veículos são sempre variáveis; sendo assim, a via-férrea tende a deteriorar-se mais rapidamente em alguns locais, desenvolvendo assentamentos diferenciais, originando assim uma degradação da via-férrea não uniforme ao longo do tempo e do espaço [Paixão, 2014].

O processo normal de degradação da qualidade geométrica da via pode ser dividido em duas fases, eventualmente três. (Figura 2.2) Em primeiro lugar, após a construção ou renovação da linha, uma rápida degradação verifica-se e estabiliza após a passagem dos primeiros milhares de eixos de comboios. Em seguida, há uma fase de degradação linear com o tempo (ou o tráfego) onde as taxas mais baixas são mais ou menos constantes. E a eventual terceira fase corresponde a um rápido aumento na taxa de degradação da via, quando se torna fundamental intervir com trabalhos de manutenção ou reabilitação [Paixão, 2014].

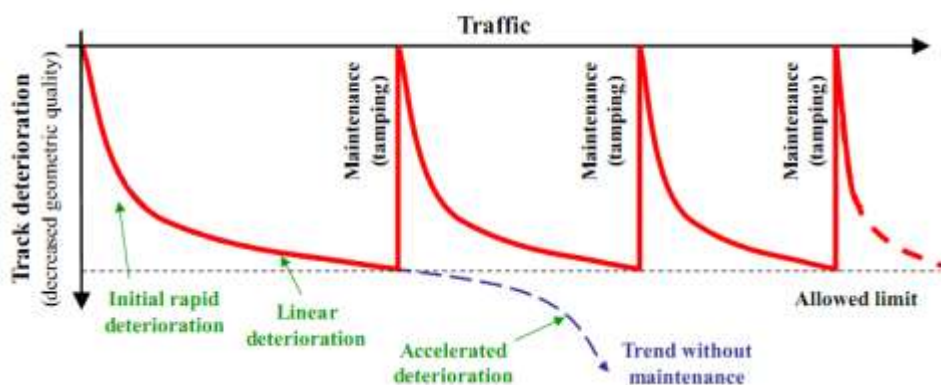


Figura 2.2 – Processo normal de degradação da qualidade geométrica da via [adaptado de Paixão, 2014]

Em condições normais, as taxas de degradação da via são influenciadas por diversos fatores, tais como [Paixão, 2014]:

- i. a quantidade de tráfego que circula na via – corresponde ao número de ciclos de carga;
- ii. a amplitude da carga provocada pelos veículos – particularmente a componente vertical da carga por eixo que atua sobre os carris, que compreende as componentes da carga estática e dinâmica (a componente dinâmica depende da velocidade do veículo, da massa suspensa, da existência dos defeitos na superfície das rodas do veículo, da rigidez vertical da via e da qualidade geométrica da via);
- iii. a qualidade da construção e dos materiais utilizados na via;
- iv. causas externas como ação de agentes erosivos, variações de temperatura excessiva, a quantidade de chuva que influencia o teor de água dos solos e frequência das operações de manutenção.

Os modelos de degradação da via para estimar a deterioração da via-férrea podem ser probabilísticos, mecanicistas, empíricos ou mecanicistas empíricos; dos vários modelos, a degradação pode dar-se de forma linear, progressiva, instantânea ou exponencial [Dantas, 2014].

As ações que mais contribuem para a degradação de uma via-férrea são as aplicadas aos carris pelos comboios. Estas ações são transmitidas à fundação pela superestrutura e dependem da intensidade das cargas, da sua frequência de aplicação, da velocidade de circulação, da qualidade do material circulante, das características da própria superestrutura (tipo de carris; natureza, estado e espessura do balastro; tipo e afastamento das travessas; tipo de ligações) e do respetivo estado de conservação [Silva, 2012].

Estudos realizados sobre os principais mecanismos de degradação permitem retirar as seguintes conclusões [Esveld, 2001, Dantas, 2014]:

- i. A deterioração do nivelamento e do alinhamento é linear em relação à tonelagem ou ao intervalo entre ações de manutenção após o assentamento inicial. Ainda assim, nem sempre o é em secções com taxas de deterioração elevadas;
- ii. A taxa de deterioração difere substancialmente de secção para secção, mesmo para aquelas que aparentam ser idênticas, em iguais condições de tráfego;
- iii. Não é estatisticamente possível afirmar que o tipo de tráfego e as características construtivas da via tenham um efeito significativo na qualidade ou na taxa de deterioração da via;
- iv. A taxa de deterioração tende a ser constante para uma dada secção da via independentemente da qualidade através das operações de manutenção e reparação;
- v. Regra geral, as “atacadeiras” (equipamento que realiza o ataque mecânico à via) melhoram a qualidade de uma secção da via para um valor aproximadamente constante.

Os fatores que podem contribuir para a degradação da geometria da via são: defeitos das rodas dos veículos (achatamentos e excentricidades); defeitos do carril; defeitos de apoio do carril; variação aleatória da posição das travessas ao longo de um trecho; variação da rigidez vertical e horizontal da via, associada por exemplo aos efeitos dos trabalhos de conservação ou às variações climáticas, nomeadamente os efeitos da variação da temperatura nos carris e os efeitos da chuva e gelo que provocam alterações nos materiais da subestrutura; assentamentos diferenciais associados à heterogeneidade da subestrutura; e alterações significativas do tipo de tráfego [Fortunato, 2005].

A degradação da via traduz-se, geralmente, por um dos seguintes estados: perda de estabilidade, perda de resiliência e ocorrência de elevados assentamentos permanentes ao nível dos carris. Na origem destes fenómenos podem estar: a modificação das condições envolventes da estrutura, em particular as que afetam a drenagem; o aumento das solicitações; e a alteração das características mecânicas dos diversos elementos, nomeadamente dos que constituem a superestrutura, da camada de balastro, das camadas de apoio ou da fundação. Ao nível da superestrutura pode ocorrer desgaste ou rotura dos elementos que a constituem. A degradação da camada de balastro, das camadas de apoio e da plataforma está associada à perda de estabilidade, local ou global, de cada uma das camadas ou do conjunto, e a assentamentos permanentes excessivos [Fortunato, 2005].

A degradação da via-férrea observa-se pelo surgimento de defeitos geométricos, defeitos de carril (na superfície e internos) e pela perda de características dos próprios componentes. Nas travessas ocorrem fissuras e vão perdendo as suas propriedades mecânicas. As fixações e ligações não soldadas tendem a desapertarem-se e a perderem rigidez e outras propriedades mecânicas. O balastro e o carril são os componentes com os quais os custos de manutenção associados são maiores, em virtude da sua maior deterioração. Quanto a travessas e fixações, os custos em manutenção restringem-se, geralmente, à sua substituição, não tendo as restantes atividades um valor expressivo. A interdependência da deterioração dos componentes da via leva a que a degradação da geometria de via, por exemplo, em associação com os movimentos do balastro, provoquem um aumento das cargas dinâmicas que resultam num aumento dos esforços a que o carril está sujeito, podendo estas, por sua vez, aumentar o desgaste e a fadiga do mesmo [Dantas, 2014].

O assentamento permanente excessivo ao nível dos carris é um dos principais modos de degradação da via, o qual é responsável pelos maiores custos de conservação. A degradação da camada de balastro devida à perda de estabilidade é pouco frequente. De facto, as características mecânicas dos materiais normalmente usados e a geometria da camada garantem a sua estabilidade relativamente às ações a que está sujeito [Fortunato, 2005].

Na análise dos trechos a renovar deve haver a preocupação de aproveitar, tanto quanto possível, a plataforma existente, de modo a reduzir perturbações na exploração da via, aquando da realização das obras. No entanto, quando a capacidade de carga da plataforma é

insuficiente, quer devido ao aumento das solicitações, quer por insuficiência das características mecânicas dos materiais, podem desenvolver-se em pouco tempo fenómenos de degradação importantes [Fortunato, 2005].

As várias inspeções à via-férrea não permitem detetar as causas das anomalias da via. As anomalias podem resultar, entre outros aspetos: i) da alteração da granulometria da camada de balastro, quer por quebra das partículas, quer por contaminação com partículas finas que ascendem da fundação; ii) da alteração da rigidez da camada de sub-balastro ou da fundação, em particular devido a modificações do estado hídrico dos materiais, que podem ter origem em problemas que ocorram nos sistemas de drenagem; iii) de assentamentos da fundação associados a fenómenos de consolidação dos terrenos; e iv) da variação das condições de apoio da superestrutura, por exemplo em zonas de transição entre terraplenagens e obras de arte e em zonas em que existem singularidades na via [Fortunato et al., 2016].

O setor ferroviário na Europa encontra-se separado verticalmente, estando a gestão da infraestrutura numa entidade e a operação noutra. No entanto, antes de mais, há um fator relevante que resulta da separação vertical do setor que nem sempre é considerado, reside no facto de um gestor de infraestrutura (GI) ao manter a infraestrutura com níveis de serviço mais baixos e em pior estado de conservação, leva a que o desgaste do material circulante seja maior, que, por sua vez, contribui para uma degradação na via-férrea mais acelerada (o efeito concentra-se em especial na qualidade geométrica de via), conduzindo a maiores custos de manutenção quer para o GI quer para os operadores, pelo que muitas vezes o valor ótimo de manutenção apenas para o GI e de igual forma para um operador, pode não o ser para o setor ferroviário como um todo [Dantas, 2014].

Capítulo 3

3. Qualidade Geométrica da via-férrea

3.1 Inspeção da Via-férrea

As inspeções têm um papel fundamental durante a vida útil e ao longo de toda a linha férrea pois ao verificarem os parâmetros geométricos da via mantêm a circulação segura e confortável para os passageiros.

As formas de avaliação de via vão-se adaptando à medida que surgem novos métodos de inspeção de via, assim como a forma de a classificar.

Devido ao facto de as vias-férreas, em Portugal, serem utilizadas por material circulante de passageiros e de mercadorias, a inspeção das vias tem um papel fundamental na evolução das condições das vias-férreas, uma vez que nos dois casos, estamos perante condições de circulação distintas e, que têm de ser favoráveis para ambas as situações.

As inspeções feitas à via-férrea são realizadas para que se possa fazer:

- A antecipação dos problemas e assim possibilitar uma melhor gestão/calendarização das ações de manutenção, com a consequente redução de custos e maior eficiência nos esforços;
- A identificação de situações que possam diminuir a qualidade do serviço. Por exemplo que coloquem em causa o conforto dos passageiros, ou que impliquem a redução das velocidades com os consequentes atrasos;
- A identificação de situações críticas para a circulação dos veículos em segurança, normalmente relacionados com a interação dinâmica entre os rodados e o carril – em última análise, para descarrilamentos.

Ao ser encontrado algum defeito na via, deve investigar-se a sua origem e proceder-se à eliminação da causa, para que o defeito não reapareça e para que a via não tenha de ser novamente intervencionada.

As diversas inspeções à via que existem permitem definir a necessidade que alguns dos materiais precisam de ser substituídos, corrigir a geometria da via, executar limpezas e lubrificações periódicas, assegurando assim a fiabilidade, segurança e disponibilidade da via.

As inspeções realizadas a pé e/ou em veículos monitorizados têm objetivos distintos; nas inspeções realizadas a pé, verifica-se o estado dos materiais, dos equipamentos instalados e o estado dos sistemas de drenagem; já nas inspeções, em veículos monitorizados, é analisado o comportamento da superestrutura, aquando da passagem de cargas e velocidades reais a que a via se encontra sujeita [Silva, 2012].

Na Europa, a medição dos parâmetros geométricos da via pode ser efetuada por um veículo de inspeção que cumpra os requisitos da série de normas europeias EN 13848. Em Portugal, as medições realizadas com equipamentos que não cumpram estes requisitos só serão aceites quando não haja disponibilidade de as mesmas serem efetuadas por um veículo adequado [IT.VIA.018, 2009].

A frequência das inspeções depende dos critérios de avaliação impostos pelas administrações ferroviárias e da importância de cada uma das linhas. Toda a informação que se obtém a partir destas inspeções, ajuda a decidir se se deve considerar a renovação da via ou não. Assim, para se conseguir realizar um bom acompanhamento e manutenção da infraestrutura, é necessário [Aribau, 2004]:

- Um conhecimento detalhado do comportamento real dos elementos da via e dos parâmetros geométricos, através da monitorização;
- A descentralização de recursos técnicos e humanos.

Em Portugal, as inspeções realizadas à via-férrea, em veículos de monitorização, como o veículo EM120 pertencente à Infraestruturas de Portugal, S.A. (anteriormente Rede Ferroviária Nacional, REFER), são realizadas duas a quatro vezes por ano.

3.2 Parâmetros geométricos avaliados

Para o material circulante poder circular existem cinco parâmetros geométricos que têm de estar dentro dos valores limite permitidos pelas normas: a bitola, o nivelamento longitudinal, nivelamento transversal, alinhamento e o empeno.

A bitola é a distância entre as faces interiores das cabeças dos carris, medida 14 mm abaixo da mesa de rolamento e em esquadria com eles, como mostra a Figura 3.1; os defeitos que ocorrem é o alargamento ou estreitamento da bitola.

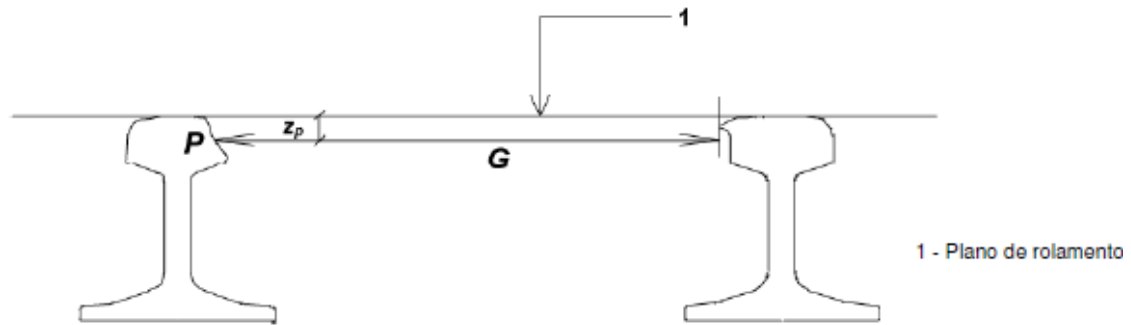


Figura 3.1 - Bitola [IT.VIA.018, 2009]

Na Península Ibérica existe, maioritariamente, a bitola de 1668 mm (bitola ibérica), enquanto na maioria dos restantes países existe a bitola de 1435 mm (bitola UIC ou internacional).

O nivelamento longitudinal é, em grande parte, responsável pela estabilidade vertical dos veículos; na presença de defeitos provoca o movimento de galope dos veículos (rotação em torno do eixo transversal da via) que deve ser minimizado (Figura 3.2).

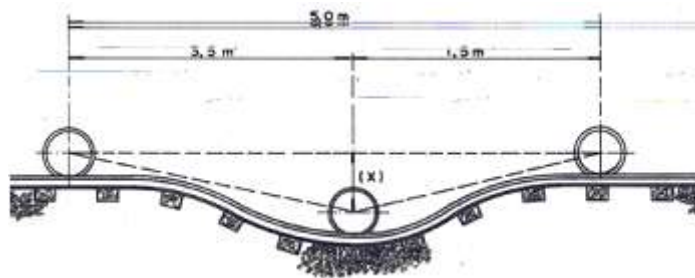


Figura 3.2 – Esquema do defeito relativo ao nivelamento longitudinal: efeito de galope nos veículos

[Rodrigues, 2012]

O nivelamento transversal (Figura 3.3), também designado por escala ou sobrelevação, é a diferença máxima na altura entre o carril exterior e interior, medida ao centro da cabeça do carril; o defeito que pode ocorrer neste parâmetro é a diferença entre a escala da via e a escala de projeto.

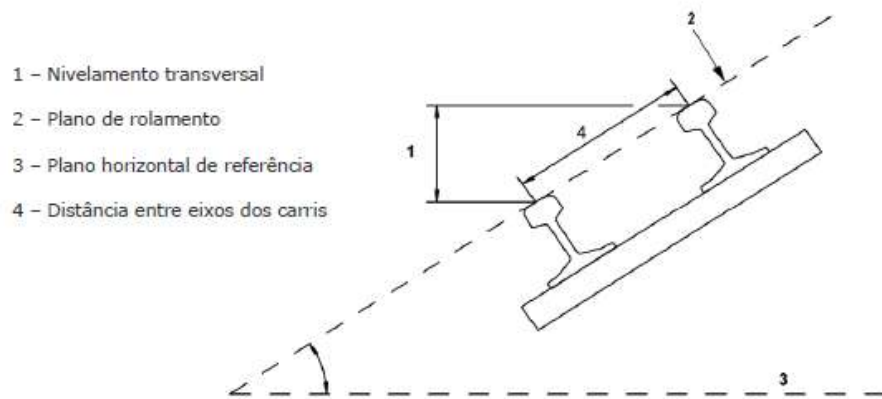


Figura 3.3 - Nivelamento transversal [IT.VIA.018, 2009]

O alinhamento longitudinal é, em grande parte, o responsável pela estabilidade lateral dos veículos (Figura 3.4).

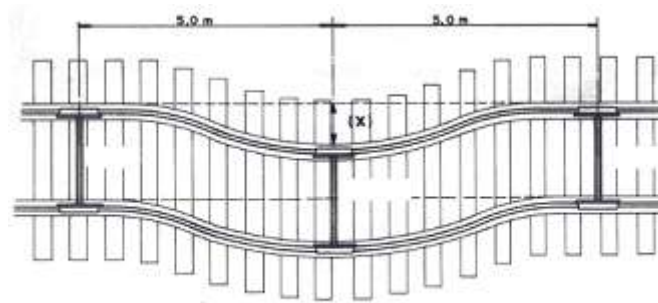


Figura 3.4 – Alinhamento longitudinal [Rodrigues, 2012]

O empeno é a diferença algébrica entre dois valores de escala medidos a uma distância definida (Figura 3.5); o seu defeito manifesta-se por irregularidades no apoio dos rodados.

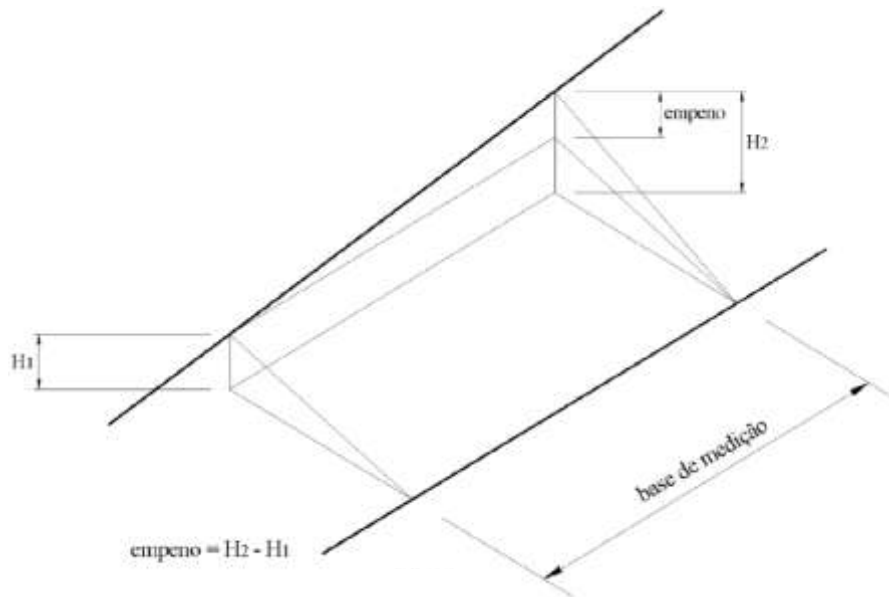


Figura 3.5 - Empeno

Para além dos parâmetros geométricos da via acima enunciados também as irregularidades ou defeitos pontuais da via, das rodas do veículo e do carril, merecem atenção aquando das inspeções, como estão indicados no Quadro 3.1 [Baldeiras, 2008].

Quadro 3.1 - Tipos de irregularidades ou defeitos pontuais da via, das rodas do veículo e do carril

Plataforma da Via	Carril, Travessas e Fixações	Perfil Transversal de Via
<ul style="list-style-type: none"> • Medição do balastro; • Identificação de troços com balastro contaminado; • Detecção de seções de via com problemas de drenagem; • Medição de espessura das camadas de sub-balastro; • Localização de intrusões (cabos, tubos, etc.). 	<ul style="list-style-type: none"> • Perfil Transversal do carril; • Defeitos Internos do carril; • Defeitos Superficiais do carril; • Desgaste Ondulatório do carril; • Fissuração de travessas; • Posição das travessas; • Falha de elementos de fixação; • Folgas nas juntas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Distância de obstáculos; • Perfil do balastro; • Distância do entre-eixo de via; • Distância à Plataforma; • Altura da Plataforma.

Os parâmetros geométricos são medidos periodicamente, consoante a importância da via-férrea e são registados por um veículo de inspeção geométrica da via.

Por forma a avaliar a qualidade geométrica da via, os valores dos parâmetros geométricos são comparados com os valores limite, que se dividem em três níveis: limite de alerta (LA), de intervenção (LI) e de ação imediata (LAI), definidos em vários documentos, tais como a IT.VIA.018 - Tolerâncias dos parâmetros geométricos da via (2009) e a EN 13848-5 (2010).

A IT.VIA.018 apresenta os valores limite de variação de bitola, nivelamento transversal e longitudinal (D1 e D2), alinhamento (D1 e D2) e empeno, para os diferentes limites. A distinção entre D1 e D2 é gama de comprimentos de onda, sendo que varia entre 3 e 25 m e 25 e 70 m, respetivamente. A IT.VIA.018 define que a:

- Tolerância de alerta corresponde ao valor do parâmetro geométrico que, quando atingido, originará que o troço em questão seja incluído na programação de trabalhos de manutenção.
- Tolerância de intervenção corresponde ao valor do parâmetro geométrico que, quando atingido, originará que o troço em questão seja, a curto prazo, alvo de ações de manutenção, para que a tolerância de ação imediata não seja atingida.
- Tolerância de ação imediata corresponde ao valor do parâmetro geométrico que nunca deverá ser atingido. Caso o seja obrigará que o defeito em questão seja alvo de correção imediata ou que o respetivo troço seja sujeito a redução de velocidade ou interdição.

A IT.VIA.018 apresenta valores de tolerância dos parâmetros geométricos da via, para dois casos distintos, primeiro no caso de receção de trabalhos e no segundo caso, valores de avaliação da geometria da via para decisão sobre ações de manutenção.

São apresentadas em seguida nos Quadros 3.2, 3.3 e 3.4, as tolerâncias dos parâmetros geométricos para as linhas de bitola ibérica (1668 mm) e europeia (1435 mm), referentes aos valores de alerta, intervenção e de ação imediata.

Quadro 3.2 - Tolerância de alerta, em milímetros, para linhas de bitola de 1668 mm e 1435 mm

[adaptado de IT.VIA.018, 2009]

Velocidade		Bitola	Bitola média	Nivelamento Longitudinal		Alinhamento		Empeno (base 3 m)
Classe	(km/h)			D1	D2	D1	D2	
VI	$V \leq 40$	-7/+25	n.a./+25	±18	n.a.	±15	n.a.	±12
V	$40 < V \leq 80$	-7/+25	-6/+25	±18	n.a.	±15	n.a.	±12
IV	$80 < V \leq 120$	-7/+25	-5/+22	±16	n.a.	±11	n.a.	±12
III	$120 < V \leq 160$	-6/+25	-3/+16	±15	n.a.	±9	n.a.	±12
II	$160 < V \leq 230$	-4/+20	-3/+16	±12	±20	±8	±15	±9
I	$230 < V \leq 300$	-3/+20	-1/+16	±10	±18	±7	±13	±9

Quadro 3.3 - Tolerância de intervenção, em milímetros, para linhas de bitola de 1668 mm e 1435 mm

[adaptado de IT.VIA.018, 2009]

Velocidade		Bitola	Bitola média	Nivelamento Longitudinal		Alinhamento		Empeno (base 3 m)
Classe	(km/h)			D1	D2	D1	D2	
VI	$V \leq 40$	-9/+30	n.a./+28	±21	n.a.	±17	n.a.	±15
V	$40 < V \leq 80$	-9/+30	-7/+28	±21	n.a.	±17	n.a.	±15
IV	$80 < V \leq 120$	-9/+30	-6/+25	±19	n.a.	±13	n.a.	±15
III	$120 < V \leq 160$	-8/+30	-4/+18	±17	n.a.	±10	n.a.	±15
II	$160 < V \leq 230$	-5/+23	-4/+18	±14	±23	±9	±17	±12
I	$230 < V \leq 300$	-4/+23	-2/+18	±12	±20	±8	±14	±12

Quadro 3.4 - Tolerância de ação imediata, em milímetros, para linhas de bitola de 1668 mm e 1435 mm

[adaptado de IT.VIA.018, 2009]

Velocidade		Bitola	Bitola média	Nivelamento Longitudinal		Alinhamento		Empeno (base 3 m)
Classe	(km/h)			D1	D2	D1	D2	
VI	$V \leq 40$	-11/+35	n.a./+32	±31	n.a.	±25	n.a.	±21
V	$40 < V \leq 80$	-11/+35	-9/+32	±28	n.a.	±22	n.a.	±21
IV	$80 < V \leq 120$	-11/+35	-8/+27	±26	n.a.	±17	n.a.	±21
III	$120 < V \leq 160$	-10/+35	-6/+20	±23	n.a.	±14	n.a.	±21
II	$160 < V \leq 230$	-7/+28	-6/+20	±20	±33	±12	±17	±15
I	$230 < V \leq 300$	-5/+28	-4/+20	±16	±28	±10	±20	±15

A IT.VIA.018 refere que os pontos onde existam pelo menos dois parâmetros que excedam as tolerâncias de intervenção serão sujeitos aos procedimentos definidos na ação imediata.

Na IT.VIA.018 existe uma tabela com valores de tolerância de alerta relativa aos valores de desvio padrão do nivelamento longitudinal D1 e alinhamento D1, para as diferentes classes de via, apresentada no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 - Tolerância de alerta do desvio padrão para linhas de bitola 1668mm e 1435mm

[IT.VIA.018, 2009]

Velocidade		Desvio padrão (mm)	
Classe	(km/h)	Nivelamento Longitudinal D1	Alinhamento D1
VI	$V \leq 40$	3,3	2,1
V	$40 < V \leq 80$	3,0	1,8
IV	$80 < V \leq 120$	2,7	1,5
III	$120 < V \leq 160$	2,4	1,3
II	$160 < V \leq 230$	1,9	1,1
I	$V > 230$	1,5	1,0

Os Quadros 3.6 e 3.7 são apresentados na EN 13848-5 e são valores recomendados de desvio padrão para o nivelamento longitudinal D1 e para o alinhamento D1, são considerados como valores de referência e por isso a IT.VIA.018 propõe como valores limite de tolerância de alerta os valores do limite superior de cada intervalo correspondente à velocidade.

Quadro 3.6 - Valores de referência para definir intervalos de limite de alerta para o $\overline{SD}_{LL,D1}$

[EN 13848-5, 2010]

Velocidade (km/h)	Desvio padrão (mm)
	Nivelamento longitudinal D1
$V \leq 80$	2,3 a 3
$80 < V \leq 120$	1,8 a 2,7
$120 < V \leq 160$	1,4 a 2,4
$160 < V \leq 230$	1,2 a 1,9
$230 < V \leq 300$	1,0 a 1,5

Quadro 3.7 - Valores de referência para definir intervalos de limite de alerta para o $\overline{SD}_{AL,D1}$

[EN 13848-5, 2010]

Velocidade (km/h)	Desvio padrão (mm)
	Alinhamento D1
$V \leq 80$	1,5 a 3
$80 < V \leq 120$	1,2 a 1,5
$120 < V \leq 160$	1,0 a 1,3
$160 < V \leq 230$	0,8 a 1,1
$230 < V \leq 300$	0,7 a 1,0

3.3 Avaliação da qualidade de via

A avaliação da qualidade geométrica representa um papel muito importante na gestão das operações de manutenção das vias-férreas pois a circulação na via depende de vários parâmetros e, caso não estejam abaixo dos valores de tolerância podem ocorrer situações que poderiam ser evitadas, como é o caso de uma via que necessite de uma intervenção imediata e por consequência fica interdita a circulação, se esse trecho tivesse sido analisado com cuidado tal acontecimento não se verificava.

O índice de qualidade global da via (TQI – Track Quality Index) era determinado para classificar a qualidade da via; os seus níveis de qualidade vão de “mau” a “bom”, passando por “deficiente” e “aceitável” consoante os valores de TQI.

Atualmente, os níveis de qualidade geométrica da via são baseados no desvio padrão do nivelamento longitudinal e do alinhamento longitudinal, de 200 em 200 metros; este tipo de classificação pode ser usada para dois fins, um deles é avaliar a qualidade da via e o outro é avaliar a necessidade de manutenção da via, com o objetivo de propor intervenções nos trechos onde a qualidade esteja reduzida, recorrendo ao ataque mecânico pesado, AMP. (Rodrigues, 2012; Lopes, 2013)

O nível de qualidade (QN) é calculado através da média dos desvios padrão do lado esquerdo e direito, em cada trecho de 200 m, quer para o alinhamento longitudinal, quer para o nivelamento longitudinal; O QN em cada secção é assumido como o pior dos resultados, podendo ser o QN do alinhamento ou o QN do nivelamento longitudinal. O Quadro 3.8 apresenta os níveis de qualidade (QN1, QN2 e QN3), tendo em conta a velocidade de circulação e o desvio padrão do nivelamento longitudinal D1 e do alinhamento D1.

Quadro 3.8 - Níveis de Qualidade Geométrica da via-férrea [Fontul, 2015]

Velocidade		Desvio padrão (mm)		Níveis de qualidade
Classe	(km/h)	Niv. Long	Alinhamento	
VI	$V \leq 40$	$\sigma \leq 3,3$	$\sigma \leq 2,1$	QN1
		$3,3 < \sigma < 4,29$	$2,1 < \sigma < 2,73$	QN2
		$\sigma \geq 4,29$	$\sigma \geq 2,73$	QN3
V	$40 < V \leq 80$	$\sigma \leq 3,0$	$\sigma \leq 1,8$	QN1
		$3,0 < \sigma < 3,9$	$1,8 < \sigma < 2,34$	QN2
		$\sigma \geq 3,9$	$\sigma \geq 2,34$	QN3
IV	$80 < V \leq 120$	$\sigma \leq 2,7$	$\sigma \leq 1,5$	QN1
		$2,7 < \sigma < 3,51$	$1,5 < \sigma < 1,95$	QN2
		$\sigma \geq 3,51$	$\sigma \geq 1,95$	QN3
III	$120 < V \leq 160$	$\sigma \leq 2,4$	$\sigma \leq 1,3$	QN1
		$2,4 < \sigma < 3,12$	$1,3 < \sigma < 1,69$	QN2
		$\sigma \geq 3,12$	$\sigma \geq 1,69$	QN3
II	$160 < V \leq 230$	$\sigma \leq 1,9$	$\sigma \leq 1,1$	QN1
		$1,9 < \sigma < 2,47$	$1,1 < \sigma < 1,43$	QN2
		$\sigma \geq 2,47$	$\sigma \geq 1,43$	QN3
I	$V > 230$	$\sigma \leq 1,5$	$\sigma \leq 1,0$	QN1
		$1,5 < \sigma < 1,95$	$1,0 < \sigma < 1,3$	QN2
		$\sigma \geq 1,95$	$\sigma \geq 1,3$	QN3

A EN 13848-6 estabelece um outro critério de classificação da qualidade geométrica de vias-férreas; a norma baseou-se numa avaliação geral da qualidade das linhas férreas na Europa, realizada no domínio D1 e, em função da distribuição dos níveis de qualidade definiram-se os diversos limites do desvio padrão. Esta norma contém a descrição da qualidade da geometria de via, a classificação de qualidade da via de acordo com os parâmetros de geometria de via, as considerações sobre a forma como esta classificação pode ser usada. Esta norma aplica-se em linhas de alta velocidade convencionais com bitola de 1435 mm ou superior [EN13848-6, 2013].

A EN 13848-6 apresenta classes de qualidade geométrica (TQC) segundo os parâmetros de nivelamento longitudinal e alinhamento. A classificação depende da velocidade de circulação e é apresentado um valor limite do desvio padrão do nivelamento longitudinal ou alinhamento para cada classe da qualidade de via (Quadros 3.10 e 3.11).

Quadro 3.9 - Classe da qualidade de via para o nivelamento longitudinal D1

[adaptado de EN 13848-6]

Velocidade (km/h)	Valor Limite do desvio padrão (mm)				
	Classe da qualidade de via				
	A	B	C	D	E
$V \leq 80$	<1,25	1,75	2,75	3,75	>3,75
$80 < V \leq 120$	<0,75	1,10	1,80	2,50	>2,50
$120 < V \leq 160$	<0,65	0,85	1,40	1,85	>1,85
$160 < V \leq 230$	<0,60	0,75	1,15	1,60	>1,60
$230 < V \leq 300$	<0,40	0,55	0,85	1,15	>1,15
$V > 300$	Não disponível	Não disponível	Não disponível	Não disponível	Não disponível

Quadro 3.10 – Classe da qualidade de via para o alinhamento D1

[adaptado de EN 13848-6]

Velocidade (km/h)	Valor Limite do desvio padrão (mm)				
	Classe da qualidade de via				
	A	B	C	D	E
$V \leq 80$	<0,90	1,25	1,95	2,70	>2,70
$80 < V \leq 120$	<0,50	0,70	1,05	1,45	>1,45
$120 < V \leq 160$	<0,45	0,55	0,75	1,00	>1,00
$160 < V \leq 230$	<0,40	0,50	0,70	0,90	>0,90
$230 < V \leq 300$	<0,35	0,40	0,50	0,65	>0,65
$V > 300$	Não disponível	Não disponível	Não disponível	Não disponível	Não disponível

3.4 Veículos de Inspeção de Via-férrea

Para serem realizadas inspeções à via-férrea existem os veículos de inspeção de via, os VIV, estes podem ser de dois tipos, manuais ou automáticos; como VIV's manuais existem o KRAB, Ultrassom, Trolley, régua eletrónica e perfilómetro, o Laserail e o MiniProfRail, como VIV's automáticos existem o EM120 e o Iris 320 (para alta velocidade). Em Portugal continental, o veículo destinado a realizar as inspeções à via-férrea é o VIV-EM120 [Fontul, 2015].

O Veículo de Inspeção de Via, VIV – EM120, é dos equipamentos mais utilizados para proceder à análise da respetiva geometria (Figura 3.5). A utilização de um veículo que circula a velocidade semelhante à de um comboio normal, podendo atingir velocidades de 120 km/h, tem a vantagem de avaliar de forma mais realista do que outros métodos o desempenho da via, já que os registos são obtidos em condições de solicitação dinâmica semelhantes às que

ocorrem durante a passagem dos comboios. Estes equipamentos permitem uma representação contínua do meio, nas secções transversal e longitudinal, fazendo uso de tecnologias não destrutivas e que não necessitam de interrupção do tráfego [Fortunato, 2005; Silva, 2012].



Figura 3.6 - VIV - EM-120 [Paixão, 2014]

O VIV-EM120 realiza as medições sem contato, ou seja, o aparelho que faz a medição encontra-se a uma certa distância de altura da via; todos os parâmetros são registados sob forma numérica e gráfica em tempo real e são inseridos num ficheiro com medições de 25 em 25 centímetros, onde as suas posições são relativas às posições sucessivas dos carris no espaço tridimensional, não existindo pontos fixos.

O EM120 tem a capacidade de determinar automaticamente todos os troços da via onde um ou mais parâmetros geométricos excedam os valores das tolerâncias, registando a sua extensão, valor máximo e respetiva localização; é capaz, também, de calcular os índices de qualidade de via em tempo real, baseando-se nas variações da aceleração. No caso da deteção de valores que ultrapassem os valores de tolerância relativos ao empeno, então o VIV-EM120 permite marcar fisicamente a via.

O veículo de inspeção EM120 reúne vários sistemas de inspeção, tais como [Baldeiras, 2013; Fontul, 2015]:

- Geometria de via;
- Geometria de catenária (altura e desalinhamento do fio de contacto);
- Perfil transversal de via (distância de obstáculos, perfil do balastro, distância do entre-eixo de via, distancia à plataforma e altura da plataforma);
- Sistema laser para medição do perfil transversal da via (largura da entrevista, gabarito, medição do perfil do balastro e medição de distâncias de obstáculos);

- Perfil transversal do carril (desgaste lateral e vertical, percentagem de cabeça do carril perdida e tipo de carril);
- Desgaste ondulatório do carril;
- Videografia (constituído por 6 câmaras CCTV- closed-circuit television (circuito fechado de televisão), 3 à frente e 3 atrás);
- GeoRadar.

O VIV EM-120 tem instalado os seguintes sistemas de medição [REFER, 2001]:

- Recetor de GPS (sistema de posicionamento geográfico), que indica a posição na Terra em que o veículo se encontra;
- Caixa inercial (IMU – Inertial Measuring Unit – unidade de medição inercial), constituída por 3 acelerómetros e 3 giroscópios; os acelerómetros que medem acelerações segundo 3 eixos que formam 90° entre si e os giroscópicos que medem as variações angulares em torno dos mesmos eixos; permite medir o alinhamento, nivelamento transversal e longitudinal;
- Encoder, (sistema de contagem da distância percorrida) que indica a distância percorrida pelo veículo através da consideração de número de rotações e do perímetro de um dos rodados;
- OGMS – Optical Gage Measuring System (unidade ótica de medição da bitola), que é um equipamento laser / ótico de medição da bitola; mede a distância que vai desde a projeção do centro do eixo do bogie traseiro sobre o plano onde a bitola é medida (paralelo e 14mm abaixo do plano de rolamento) a cada um dos carris. Este sistema está integrado com o IMU na definição dos alinhamentos.
- Georadar - GPR (Ground Penetrating Radar), radar de prospeção. É um radar que emite impulsos eletromagnéticos de alta frequência, em forma de onda sinusoidal que se propaga verticalmente através das várias camadas, sendo parte dela refletida em cada delimitação entre camadas. Este sistema permite a medição das camadas e deteção de mudanças nas infraestruturas ferroviárias.

Capítulo 4

4. Metodologias para a análise de evolução das condições das vias-férreas

4.1 Metodologia existente

O veículo de inspeção utilizado nas linhas férreas portuguesas, tal como já foi dito, tem a capacidade de determinar automaticamente os troços onde existam um ou mais parâmetros geométricos acima dos valores de tolerância, registando as suas características e posição; também lhe permite assinalar localmente e instantaneamente os pontos onde os valores relativos ao empeno, ultrapassam os valores limite, visto que o empeno é um dos parâmetros que mais relevância tem aquando da circulação dos veículos na via pois caso contrário, a linha tem de ser intervencionada e para isso, a circulação tem de ser interrompida.

Aquando das inspeções e levantamentos no terreno é feita a caracterização das necessidades da infraestrutura da linha férrea em causa, para, posteriormente, ser apresentada a proposta de intervenção; estes pontos são reunidos num Relatório de Grupo de Trabalho.

Na caracterização das necessidades da infraestrutura são indicadas as ações que se consideram imprescindíveis para conseguir repor o desempenho da via, particularmente em termos de segurança e conforto dos passageiros.

É exposto um pequeno histórico com as últimas alterações realizadas nos diferentes troços da linha em causa, indicando desde alterações de armamento, rebalastragem, desguarnecimentos pontuais até a uma renovação integral da via, RIV. É indicado também a totalidade de quilómetros renovados, salientando a idade daqueles que ainda não foram submetidos a qualquer intervenção.

Em anexo do Relatório de Grupo são apresentadas umas tabelas, cujo preenchimento resultou das inspeções realizadas à linha férrea; a finalidade das tabelas é poder indicar o estado geral da via, recorrendo à observação visual das condições da via. Estas tabelas reúnem os vários

aspectos observados na via onde é indicado, com cores para uma leitura mais fácil e acessível, segundo os pontos quilométricos:

- as várias referências na via, como túneis, pontes, PN's e estações/apeadeiros;
- o estado de geometria de via segundo a classificação de geometria de via (Quadro 4.1);
- o tipo de carril (54 E1 ou 60 E1) e o seu estado;
- o tipo de travessas ao longo da via, podendo ser madeira ou betão em bibloco ou monobloco;
- o nível de colmatagem do balastro – visível à superfície e, no caso de utilização do Georadar, próximo à superfície;
- a informação sobre drenagem – tipo de valeta (lado esquerdo ou direito, de terra, betão ou alvenaria) e o seu estado e estado da passagem hidráulica;
- os taludes identificados para intervenção;
- as ações relevantes de planos anteriores, como reabilitação de via e substituição do carril.

No relatório são apresentados os troços referentes ao estado da geometria considerados como mau ou deficiente, indicando a sua extensão total e a extensão relativa à classificação Má/Deficiente e a sua percentagem. O critério aplicado tem por base a taxa de degradação do nivelamento longitudinal, os valores são indicados no quadro seguinte.

Quadro 4.1 - Critério para classificação da geometria de via

Classificação	Niv. Long (Estado)	Taxa de Degradação
Má	QN3	
	QN2	Superior a 0,5 mm/ano
Deficiente	QN2	Até 5 mm/ano
	QN1	Superior a 0,5 mm/ano
Aceitável	QN1	Até 5 mm/ano

Dado o fato de ao depararmos com um parâmetro que esteja acima dos valores de tolerância, o procedimento adotado é o de reduzir a velocidade máxima de circulação na via, abrandando a sua evolução, impedindo a passagem para valores limites de ação ou até mesmo intervenção imediata; assim, e para avaliar os atrasos que essa alteração pode causar é determinado o atraso teórico que os comboios ao circularem naquela linha vão sofrer se se aplicarem as novas limitações de velocidade.

No Relatório de Grupo de Trabalho são também apresentadas as intervenções propostas tendo em conta a avaliação feita aquando da realização das inspeções; as intervenções têm vista a melhorar os níveis de operabilidade da linha e são estabelecidas as ações a efetuar para cada troço, desde a substituição do carril, a reabilitação de drenagem até ao desguarnecimento

mecânico da via. O Grupo de Trabalho descreve os troços a intervencionar, os seus custos estimados, os prazos e define os trabalhos que cada atividade contempla.

A IP, Infraestruturas de Portugal S.A, da qual faz parte a antiga REFER, possui várias normas a serem aplicadas às linhas férreas da qual temos a IT.VIA.018, que define as tolerâncias dos desvios verificados em relação aos valores de referência dos parâmetros geométricos da via para linhas de bitolas 1668 mm, 1435 mm e 1000 mm.

Assim e segundo a IT.VIA.018, para avaliar se uma via-férrea deve sofrer ou não ações de manutenção deve ter-se em conta três limites: alerta, intervenção e ação imediata, estes valores estão descritos nos Quadros 3.2, 3.3 e 3.4, para valores absolutos dos cinco principais parâmetros geométricos; uma outra forma de avaliar a possibilidade de ações de manutenção é acompanhar a evolução do estado da via avaliando o desvio padrão do nivelamento longitudinal e/ou do alinhamento, enunciados no Quadro 3.5.

Uma outra forma de classificar a via-férrea é utilizar o índice de qualidade global da via, TQI, como já foi enunciando no capítulo anterior, onde os seus níveis de qualidade estão descritos no Quadro 3.8; este método já é antigo e atualmente, em Portugal, a análise de qualidade de via é determinada a partir do desvio padrão do nivelamento longitudinal e do alinhamento, sendo atribuída a classificação QN1, QN2 ou QN3, como está indicado no Quadro 3.9, tendo em consideração as velocidades máximas de circulação permitidas.

Sendo que as normas da IP são baseadas em valores padrão definidas pelas normas europeias, estas também possuem uma classificação para a qualidade geométrica da via, tendo em conta um dos parâmetros geométricos, podendo a via ser classificada segundo o desvio padrão do nivelamento longitudinal ou do alinhamento.

4.2 Metodologia proposta

Observando que existem diversas formas e critérios para classificar a via-férrea e ao fato de os relatórios de trabalho realizados aquando das inspeções feitas à linha não serem satisfatórios ao ponto de acompanhar a evolução da mesma, propõe-se a aplicação de uma metodologia onde é possível classificar a via consoante os padrões europeus, aliando as novas tecnologias para cruzar informação que poderá vir a ser relevante no caso de defeitos sistemáticos, uma vez que as inspeções realizadas têm como objetivo avaliar se os parâmetros estão dentro dos valores limite e não em perceber a causa dos mesmos e encontrar um padrão na evolução do estado da via.

Para a metodologia proposta analisou-se um troço de uma via-férrea; inicialmente, fez-se uma avaliação geral aos parâmetros geométricos para entender se o troço escolhido teria um

elevado número de defeitos e, tendo em conta a sua localização, perceber quais os locais mais propícios a ter uma evolução mais rápida e natural.

Dado o fato de o número de dados registados sobre o troço escolhido exceder as dezenas de milhares, a utilização do MATLAB foi um dos requisitos para manipular os dados, facilitando assim o seu manuseamento. Aplicando a um exemplo, permite selecionar apenas os dados relativos a um certo intervalo de velocidades, ou a um certo intervalo de valores de nivelamento longitudinal D1, criando gráficos demonstrando assim uma avaliação mais clara dos inúmeros pontos existentes.

Também através do MATLAB é possível localizar cada ponto no mapa, entendendo assim as zonas mais afetadas e os seus valores de defeito; aproveitando, ferramentas já desenvolvidas em ambiente MATLAB que permite a análise e comparação dos resultados obtidos pelo veículo de inspeção com outros parâmetros relativos à via-férrea, integrados numa representação georreferenciada [Paixão, 2014; Paixão et al, 2016].

Relativamente ao estado da via foram avaliadas as classes de qualidade da via da linha escolhida, tendo em conta os parâmetros geométricos do nivelamento longitudinal D1 e alinhamento D1. Para isso, foi considerando um desvio padrão de 200 m de janela móvel sendo determinado da forma como está representada pelas fórmulas seguintes ((1) e (2)), onde é calculado o valor médio do desvio padrão para o LL_{D1} e AL_{D1} efetuando a média do desvio padrão do lado esquerdo e do lado direito da via, estando estas condições enunciadas na EN 13848-6. Para isso, foi calculada a distribuição acumulada dos parâmetros geométricos, permitindo assim determinar as percentagens do troço da via-férrea inseridas em cada classe de qualidade geométrica de via, tendo como referência os valores dos Quadros 3.10 e 3.11.

$$\overline{SD}_{LL} = \frac{\overline{SD}_{LL}^{esq} + \overline{SD}_{LL}^{dir}}{2} \quad (1)$$

$$\overline{SD}_{AL} = \frac{\overline{SD}_{AL}^{esq} + \overline{SD}_{AL}^{dir}}{2} \quad (2)$$

São elaborados gráficos onde se pode acompanhar a evolução do valor absoluto do nivelamento longitudinal D1 e do valor médio do desvio padrão do nivelamento longitudinal das campanhas escolhidas ao longo do troço, com janelas móveis de desvio padrão de 75 e 200 m.

Com o conhecimento de que as singularidades têm zonas de apoio distintas, temos uma evolução distinta comparando com a totalidade da via; realizou-se também um estudo considerando apenas as singularidades onde podemos observar a evolução das mesmas ao longo do tempo, realizando e comparando os valores médios do desvio padrão do nivelamento longitudinal D1 entre os pontos quilométricos onde as singularidades têm início e fim das mesmas.

Com intuito de poder comparar quantitativamente a totalidade da via com apenas as zonas onde se inserem as singularidades, é determinada a taxa de evolução para ambos os casos, esperando que se venha a confirmar que em zonas de singularidades a taxa de variação seja superior à taxa de variação de todo o troço; são determinadas as taxas de variação para o nivelamento longitudinal D1 para a totalidade da via e para cada uma das singularidades.

Para complementar toda esta informação recorreu-se à elaboração de vários diagramas de caixa, é um método que é considerado pouco influenciado pelos valores atípicos (outliers), permite localizar e analisar a variação dos dados, identifica onde estão localizados 50 % dos valores mais prováveis, fornecendo informações sobre a mediana e os quartis da variável a ser analisada.

Mais uma vez, é possível recorrer à ajuda do MATLAB para a criação desses diagramas pois através de uma função existente chamada *boxplot*, este identifica o valor da mediana da amostra e calcula a altura da caixa, através da estimativa do quartil inferior e do quartil superior, ou seja, onde estão localizados os 25 % dos menores valores e 75% dos maiores valores, respetivamente; por fim, apresenta os diagramas de caixa que é representado pelo retângulo, onde estão indicados a mediana, percentil 25 e 75 e os valores atípicos de cada variável.

Na Figura 4.1 está representado o fluxograma da metodologia proposta de modo a ser mais perceptível a sua compreensão.

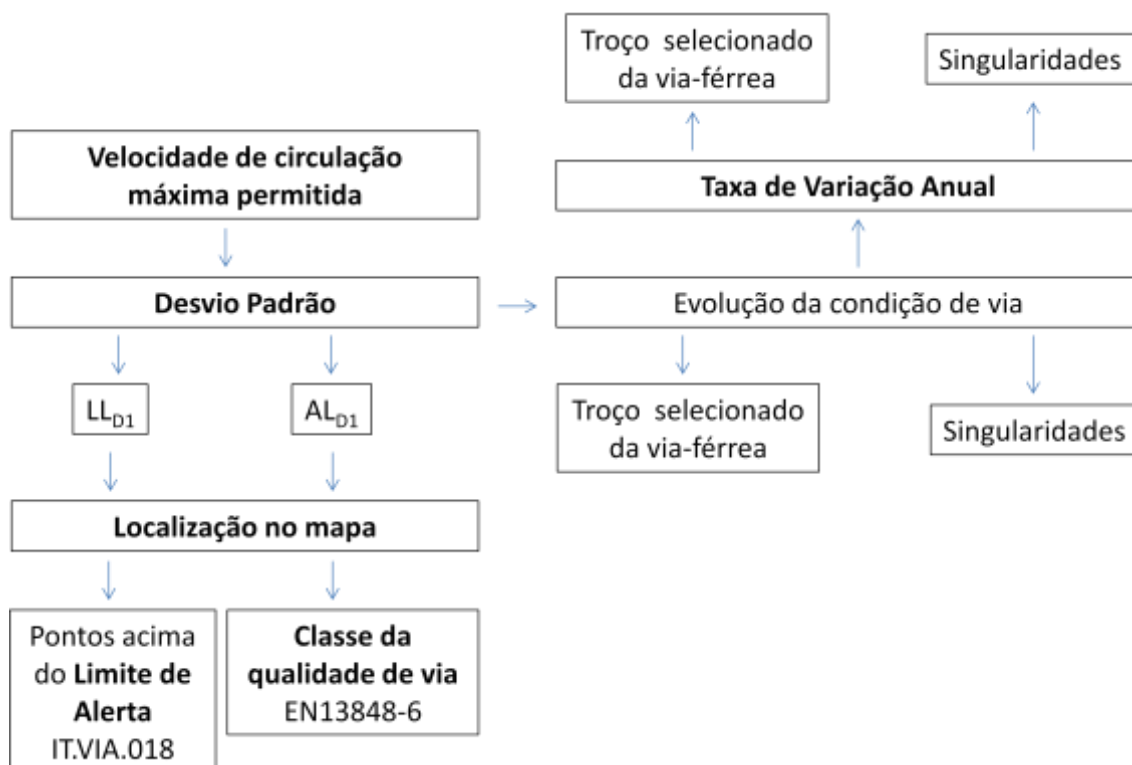


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia proposta

Capítulo 5

5. Caso de Estudo

5.1 Caracterização da via-férrea

Para a aplicação do método de análise proposto considerou-se ser importante o estudo de um trecho de linha férrea que apresentasse: i) uma extensão relevante; ii) um tráfego ferroviário de mercadorias e de passageiros que estivesse em operação; iii) um estado de maturidade avançado no que se refere à vida útil da mesma; e iv) alguma variabilidade das suas características ao longo da extensão, em particular no que se refere ao tipo de elementos do armamento de via e ao tipo de subestrutura. Assim, tendo em conta estes fatores foi selecionado um troço com cerca de 50 km de extensão, com velocidades máximas de circulação permitidas entre os 40 e 160 km/h e com um número significativo de singularidades.

Por motivos de sigilo, será propositadamente omissa a linha a que o presente troço pertence, bem como os pontos quilométricos do mesmo.

Nos cinquenta quilómetros de extensão do troço da via-férrea selecionado existe alguma variabilidade dos componentes da superestrutura da via, em particular são utilizados diferentes tipos de carril e de travessa: em cerca de 22 quilómetros é utilizado o carril do tipo 54 E1 e nos restantes, o carril 60 E1; relativamente ao tipo de travessas são utilizadas travessas de madeira e betão bibloco ou monobloco, em extensões totais de aproximadamente de 4, 18 e 28 km, respetivamente. A Figura 5.1 ilustra a distribuição dos vários elementos na via-férrea ao longo dos pontos quilométricos.

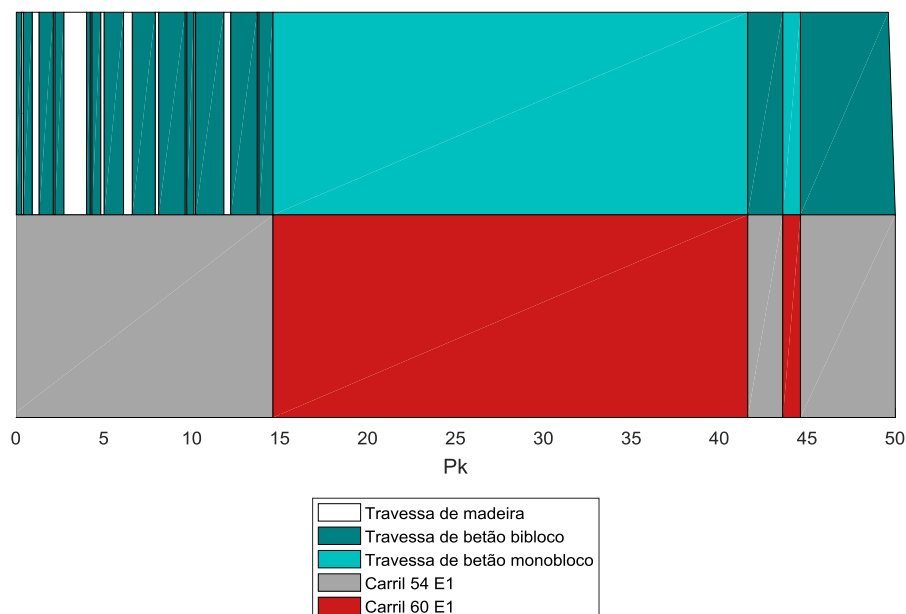


Figura 5.1 - Distribuição do carril e travessas na via-férrea em análise

A linha férrea analisada com a bitola ibérica (1668 mm), percorre vários tipos de eventos/singularidades como túneis, pontes, estações/apeadeiros, passagens de nível de veículos, atravessamentos pedonais e passagens inferiores e superiores.

As passagens hidráulicas, apesar de também serem singularidades na via-férrea relevantes, não foram consideradas para esta análise devido ao fato de não ter sido possível determinar a localização das mesmas com a precisão necessária. Através das imagens de satélite consultadas na plataforma “Google maps”, não se conseguiu identificar esses mesmos eventos.

No intuito de verificar as singularidades assinaladas no relatório sobre o estado atual da linha e na impossibilidade de percorrer a via-férrea “*in situ*”, utilizou-se o mapa do Google através do MATLAB. Este método, no seguimento de trabalhos anteriores [Paixão, 2014] foi desenvolvido em ambiente MATLAB para o processo de assinalar os dados disponíveis e que faz uso da função `plot_google_map.m`. Esta função foi desenvolvida por Zohar Bar-Yehuda, estando disponível na biblioteca on-line do MATLAB (Ficheiro ID:#27627), em <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27627-plot-google-map>.

Efetuuou-se o registo dos pontos quilométricos das singularidades assinaladas no relatório e utilizando a função desenvolvida para o MATLAB, observou-se que muitas das singularidades não estavam registadas e, que em certas zonas do traçado da via onde a habitação é muito próxima existe uma espécie de “atalhos” devido ao fato da população atravessar a linha – atravessamentos pedonais não autorizados.

Assim, efetuou-se o mapeamento da via no MATLAB, considerando as singularidades que não estavam assinaladas e ajustando a posição daquelas que, por vezes, tinham erros na sua localização – por vezes verificaram-se erros de posicionamento de cerca de 100 metros. Quanto à localização das singularidades não registadas, anotou-se uma a uma e foi encontrada por tentativas a aproximação ao ponto quilométrico correspondente; contabilizou-se no final, um total de noventa e duas singularidades, sendo apresentado no Quadro 5.1 o tipo de singularidade e o número de unidades de cada singularidade existente no troço.

Quadro 5.1 - Tipos e respetiva contabilização das singularidades







Singularidades	Estações	PI	PN	PNe	AP_{NA}	Pontes	PS	Túneis	Total
Nº.	12	22	3	4	11	9	21	10	92

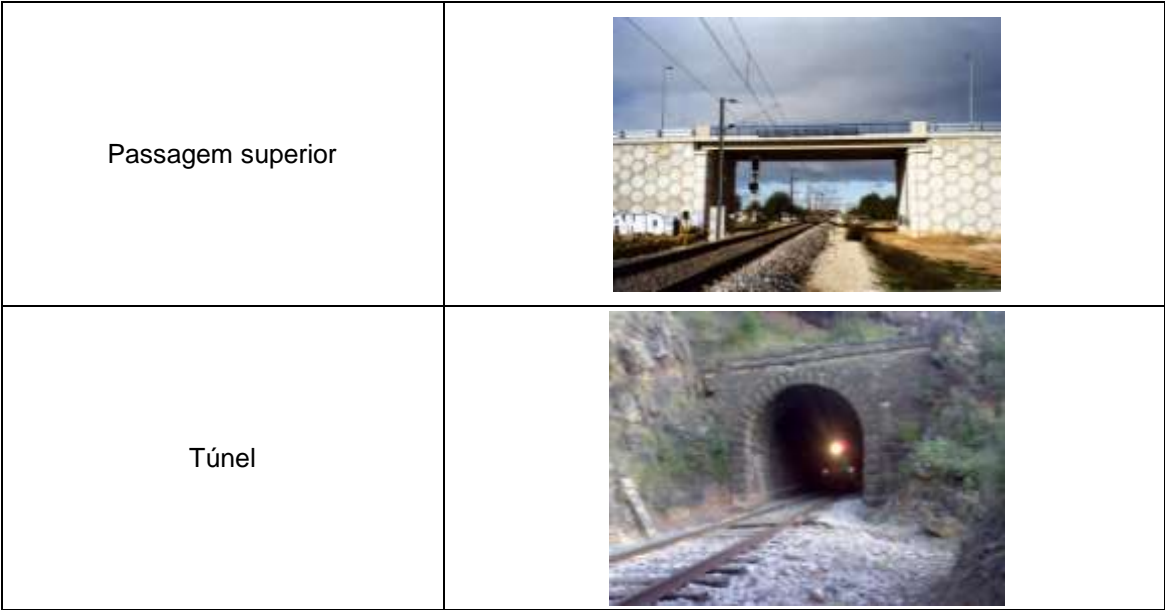
Legenda: PI – Passagem Inferior; PN – Passagem de Nível; PNe – Passagem de Nível encerrada; AP_{NA} – Atravessamento Pedonal não autorizado; PS – Passagem Superior.

Na Figura 5.2 apresentam-se os tipos de singularidades que o troço da via-férrea atravessa. As imagens são apenas ilustrativas, sendo que nenhuma delas corresponde ao troço em estudo.

Na Figura 5.3 apresenta-se o traçado esquemático da linha e estão assinaladas as posições relativas de todas as singularidades da via-férrea ao longo dos 50 km, num mapa obtido com a ferramenta desenvolvida em MATLAB. É de notar que as coordenadas latitude e longitude deste mapa são relativas à origem do trecho de linha em estudo, pelo que não têm qualquer referência geográfica.

Para uma melhor visualização da informação apresentada na Figura 5.3, sem um grande aglomerado de singularidades, o Anexo A tem uma sequência de figuras assinalando em cada uma delas o traçado da via e as singularidades existentes, onde é considerado ou a posição ou o início e o fim da singularidade.

Estação	
Passagem inferior	
Passagem de Nível	
Passagem de Nível encerrada	
Atravessamento Pedonal não autorizado	
Ponte	



©2016 Google

Figura 5.2 - Imagens ilustrativas do tipo de singularidades estudadas

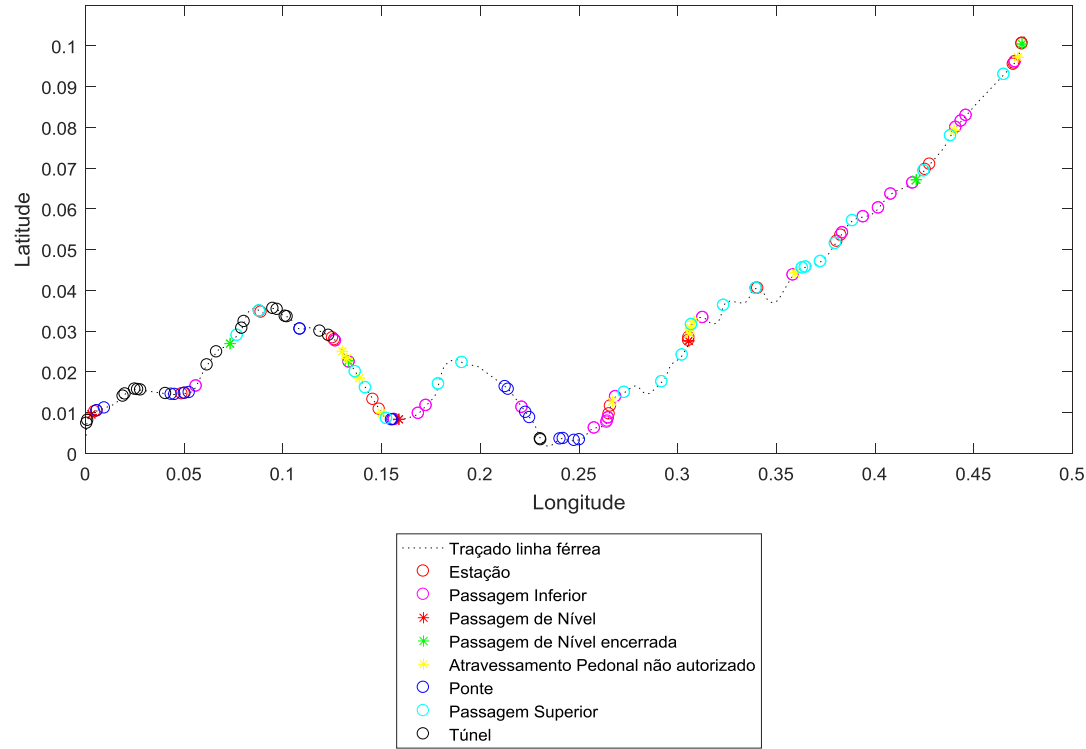


Figura 5.3 – Traçado esquemático do trecho e posições relativas das singularidades assinaladas

5.2 Dados analisados

A metodologia proposta para avaliar a evolução da condição da via-férrea passou por um processo de pré-seleção, dado que apenas se iria avaliar um troço de uma linha férrea em Portugal. Assim, e como a linha toda a ser estudada teria uma extensão de cerca de 300 km, decidiu avaliar-se apenas um troço representativo da mesma.

As inspeções à via-férrea são realizadas cerca de duas vezes por ano, uma efetuada na primavera/verão e outra no outono/inverno, registando assim possíveis alterações na via devido ao teor em água existente.

Dado que o EM120 não circula pela linha férrea avaliando de uma ponta a outra a via mas sim por troços, foram sobrepostas todas as campanhas referentes aos últimos quatro anos de modo a perceber se existia alguma em que houvesse registo do mesmo troço. Observou-se então que existia o registo de dois troços que se repetiam todos os anos, tendo início e fim em pontos quilométricos relativamente próximos.

Para definir qual o troço a escolher, visto que os dois troços pré-selecionados têm características distintas, um deles tem um elevado número de singularidades e não tem registado qualquer tipo de intervenção e o segundo troço está incluído na lista de pontos quilométricos onde foi realizado o desguarnecimento mecânico.

Na expectativa de observar uma evolução gradual ao longo do tempo na via-férrea a ser analisada, resolveu-se fazer a análise no troço da linha da qual não tinha sido feita nenhuma intervenção pois no caso de uma linha intervencionada, esta sofre alterações distintas provocando evoluções diferentes àquelas que uma via não intervencionada desenvolve.

Depois de terem sido realizadas e avaliadas algumas tentativas no âmbito de encontrar uma forma de analisar os dados registados pelo VIV-EM120, tentou encontrar-se um método que fosse fácil de interpretar mas ao mesmo tempo fornecesse conclusões plausíveis sobre os registos. De seguida, procedeu-se à avaliação do estado da via relativamente ao nível de tolerância de alerta, dando a informação de que a via estaria ou não dentro dos valores limite das normas, baseada na série de normas europeias - EN 13848.

O ficheiro gerado aquando da passagem do VIV-EM120 na linha a ser inspecionada, tem uma vasta gama de dados relativos a cada ponto da via-férrea, obtidos a cada 25 cm, como já foi referido; assim e, para este estudo, deu-se apenas relevância a alguma informação contida nesses ficheiros, como é o caso do ponto quilométrico, da velocidade máxima de circulação, das coordenadas geográficas (latitude e longitude), dos valores registados para cada parâmetro geométrico, dando maior importância ao nivelamento longitudinal D1 e alinhamento D1.

A consideração de apenas esta informação deve-se aos seguintes aspetos: i) os dois parâmetros geométricos são dois dos cinco principais parâmetros que as vias-férreas são usualmente analisadas e se estiverem acima dos valores de tolerância, então há que tomar medidas para esta ser intervencionada; ii) os valores da velocidade máxima de circulação para cada ponto são fundamentais, uma vez que a metodologia proposta tem por base critérios que dependem da velocidade que é praticada na via; e iii) o fato de considerar as coordenadas geográficas de cada ponto, permite assinalar no mapa a localização desse mesmo ponto.

Para este mesmo troço há o registo de sete campanhas realizadas e, dado o volume de trabalho e complexidade decidiu-se analisar apenas três destas, tendo em consideração que se efetuaram em duas estações do ano distintas, considerando assim as campanhas de março e novembro de 2012 e março de 2016.

5.3 Resultados

Os resultados apresentados, como foi dito anteriormente, encontram-se adaptados por uma questão de sigilo. Assim sendo as coordenadas (latitude e longitude) e os Pk's são os relativos à origem do trecho em análise.

O traçado da via-férrea a ser analisado encontra-se entre o Pk 0 e Pk 50 e para enquadrar a localização na latitude e longitude, esta encontra-se respetivamente, entre]0:0,12[e]0:0,5[.

Como a avaliação dos parâmetros geométricos da via está relacionada com as diferentes velocidades (Quadros 3.2 a 3.11), é importante classificar cada troço de acordo com as velocidades permitidas, para isso a Figura 5.4 mostra, de acordo com a sua localização geográfica relativa, o valor máximo de velocidade de circulação permitido; na Figura 5.5, está apresentado um gráfico que relaciona as velocidades máximas de circulação permitidas com os pontos quilométricos correspondentes.

No Quadro 5.2 estão resumidas as características relativas à gama de velocidades, apresentando a extensão da linha onde é permitido circular em cada uma das gamas de velocidades, indicando a percentagem correspondente relativa à totalidade do troço escolhido.

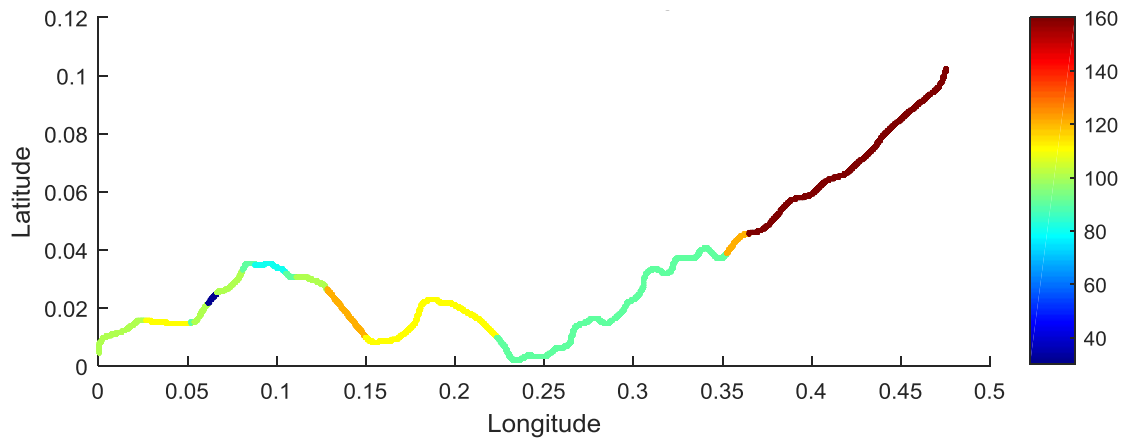


Figura 5.4 – Mapa com velocidades máximas de circulação permitidas no troço em análise (em km/h)

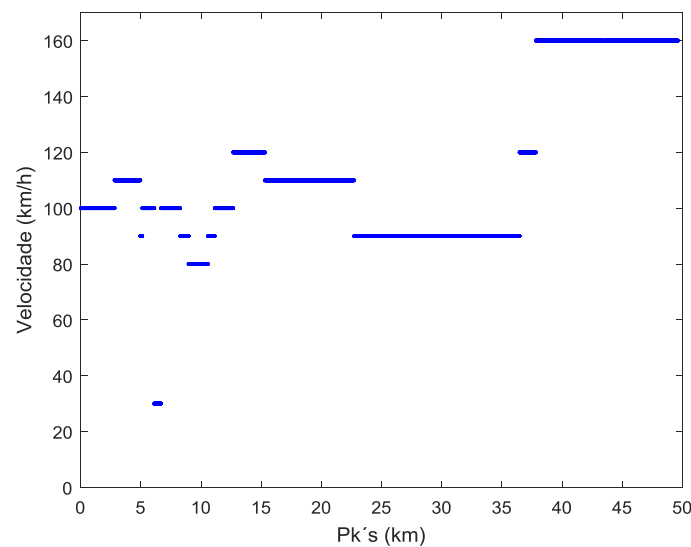


Figura 5.5 - Gráfico que relaciona as velocidades máximas de circulação permitidas com Pk's

Quadro 5.2 – Resumo das características relativas à gama de velocidades

	Gama de velocidades				Total
	$V \leq 40$	$40 < V \leq 80$	$80 < V \leq 120$	$120 < V \leq 160$	
Extensão (km)	0,5	1,6	35,6	11,8	49,6
Percentagem (%)	1,1	3,2	71,9	23,8	100,0

Pela análise das Figuras 5.4 e 5.5, a gama de velocidades é distinta em vários tramos do percurso. Normalmente, a gama de velocidades de um determinado troço é estabelecido inicialmente em projeto, em função do seu traçado. No entanto, é prática comum as gestoras de infraestruturas ferroviárias ajustarem as gamas de velocidades em função de vários aspetos, como por exemplo, por questões de segurança, de ruído excessivo, em resultado de trabalhos de manutenção ou em resultado de uma diminuição relevante da qualidade geométrica. A título de exemplo, considere-se um trecho de via hipotético onde, num

determinado momento, é possível circular a uma velocidade máxima de 120 km/h; depois de realizada uma inspeção da qualidade geométrica da via desse trecho, verifica-se que a mesma apresenta vários defeitos relevantes que não poderão ser corrigidos em tempo útil; para minimizar os riscos de falha de alguns componentes e, eventualmente, de descarrilamento, pode decidir-se por baixar a velocidade máxima de circulação para 80 km/h.

Tendo em conta, as extensões de via correspondentes às diferentes gamas de velocidades no trecho analisado, determina-se que as gamas com maior significado são as que dizem respeito às velocidades entre 80 e 120 km/h e entre 120 e 160km/h; assim, vão ser analisados e apresentados em maior detalhe os resultados relativos a estas gamas.

5.3.1 Avaliação geral dos parâmetros geométricos

Para uma visão geral dos parâmetros geométricos no trecho de via analisado, elaborou-se um gráfico onde se pode visualizar, ao mesmo tempo, todos os parâmetros geométricos, nomeadamente: a bitola, a bitola média, empeno com base de 3 metros, nivelamento longitudinal D1 e D2 e alinhamento D1 e D2. A estes, junta-se o desvio padrão do nivelamento longitudinal D1 e o desvio padrão do alinhamento D1, para avaliar a dispersão dos valores registados.

Nas Figuras 5.6 e 5.7 são apresentados os gráficos representativos relativos aos parâmetros geométricos da via entre os Pk's 0 e 25 e os Pk's 25 e 50, comparando as campanhas de Março de 2012 e Março de 2016. No Anexo B é exposta uma versão mais detalhada, em intervalos de 10 km para uma visualização mais clara dos dados.

Como já foi enunciado, o VIV-EM120 regista os defeitos dos vários parâmetros geométricos e, particularmente, regista as variações do nivelamento longitudinal D1 e do alinhamento D1 relativamente ao carril esquerdo e ao carril direito; sendo assim, as Figuras 5.8 a 5.11 dizem respeito aos valores registados segundo o carril direito e o carril esquerdo (nessas Figuras a amplitude das variações em cada local é representada por circunferências, na escala de cor indicada, e cuja dimensão é proporcional ao quadrado da amplitude do defeito).

Da análise dos resultados, salienta-se o fato de que os primeiros 25 quilómetros de extensão do trecho da via-férrea analisados coincidirem com um maior número de singularidades e com a existência de travessas de madeira no armamento da via. É de notar que ao observar as Figuras 5.8 e 5.9, relativas à variação do nivelamento longitudinal, se verificam valores geralmente superiores, quando comparados com os obtidos na restante via.

Contudo, e sem indicação nestas Figuras sobre as velocidades máximas permitidas na via, e consultando o Quadro 3.2, relativa às tolerâncias de alerta sabemos que o valor limite de alerta para o nivelamento longitudinal D1 varia entre ± 15 a ± 18 ; ora, sabendo que a velocidades mais

baixas, a variação do parâmetro pode ter uma amplitude maior, podemos concluir que sim, que existem pontos na via que estão acima desses valores; porém na última campanha podemos observar que existem valores superiores a 18, valor limite de alerta para velocidades inferiores a 40 km/h.

Quanto à avaliação sobre a variação dos valores do alinhamento D1, retiramos igualmente do Quadro 3.2, que o limite de alerta varia entre ± 9 e ± 15 , sendo este último relativo a velocidades inferiores a 40 km/h. Os mapas gerados no MATLAB acerca do AL são os assinalados nas Figuras 5.10 e 5.11.

Nas Figuras 5.10 e 5.11 identifica-se facilmente a variação ligeira do AL_{D1} , oscilando entre ± 5 , valores abaixo do valor limite de tolerância; existem pontualmente alguns picos que poderão estar eventualmente acima dos valores de tolerância de alerta, dependendo apenas das velocidades máximas, estudo esse feito posteriormente e, abordado no tópico seguinte.

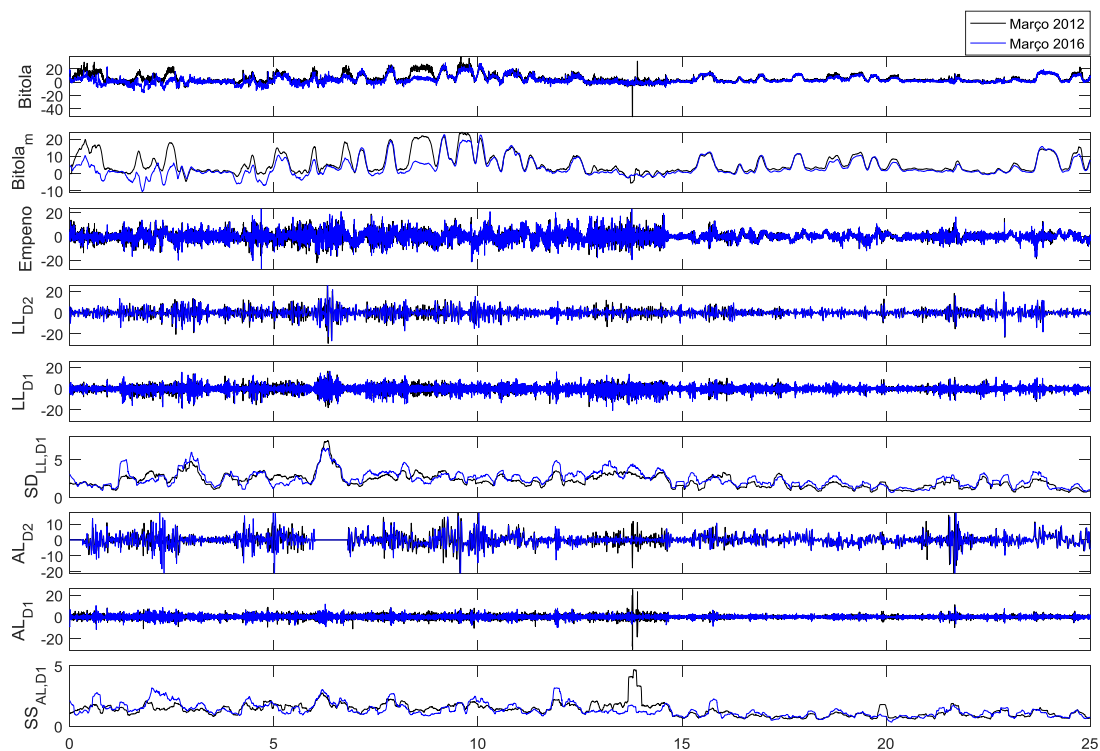


Figura 5.6 - Parâmetros geométricos e desvio padrão do LL e AL entre o Pk 0 e Pk 25

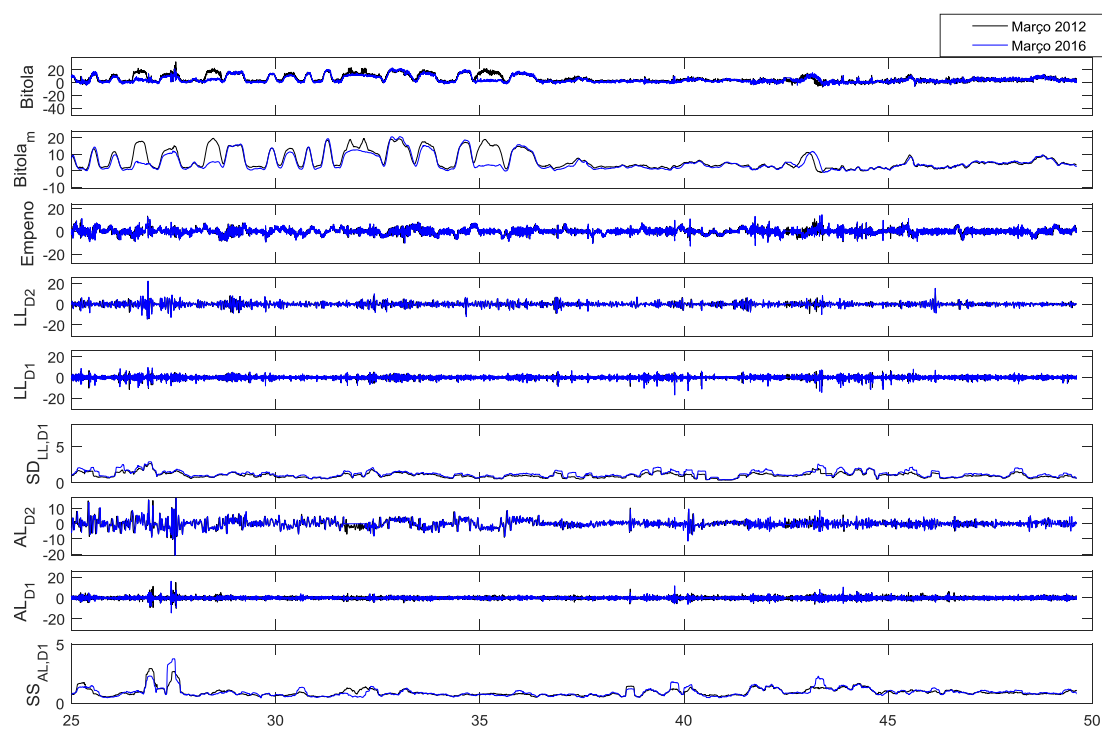


Figura 5.7 - Parâmetros geométricos e desvio padrão do LL e AL entre o Pk 25 e Pk 50

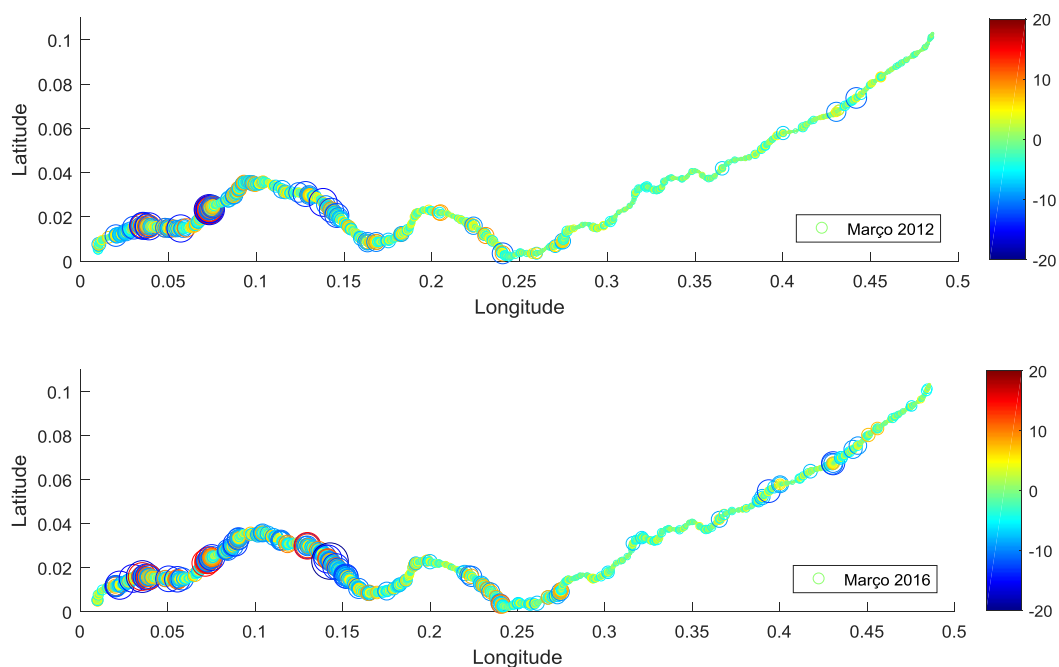


Figura 5.8 - Mapa com valores do registo da EM120 relativamente ao LL_{D1}^{Dir} , em Março de 2012 e Março de 2016

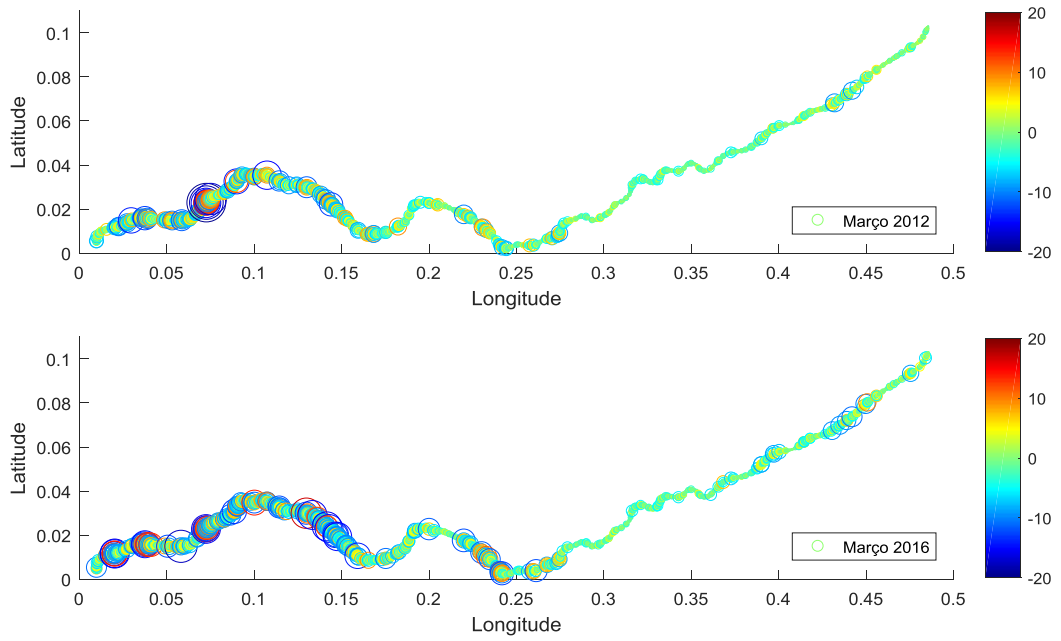


Figura 5.9 - Mapa com valores do registo da EM120 relativamente ao LL_{D1}^{Esq} , em Março de 2012 e Março de 2016

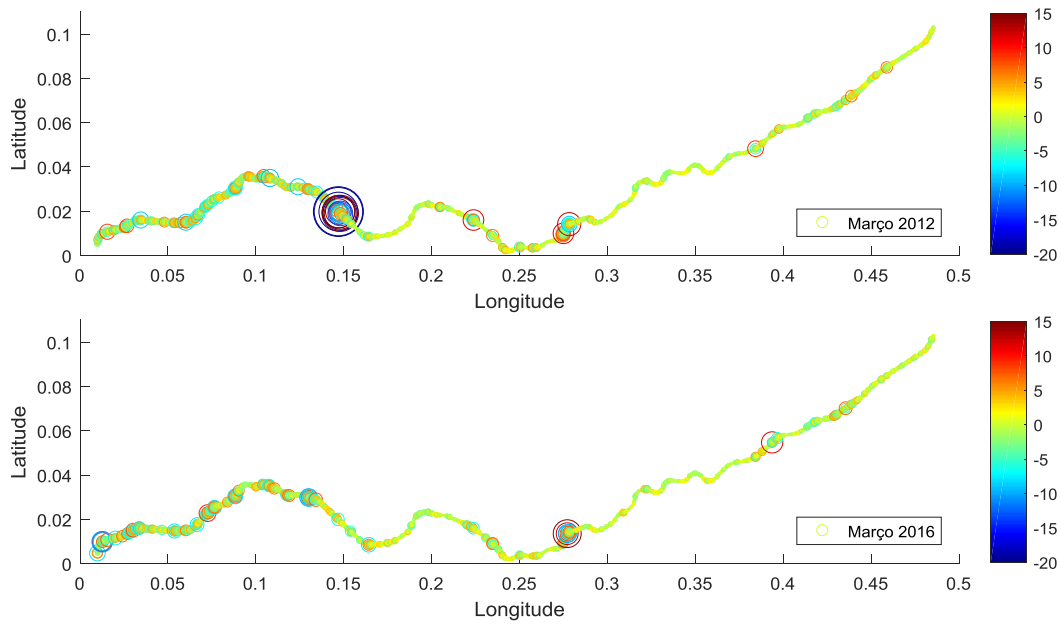


Figura 5.10 - Mapa com valores do registo da EM120 relativamente ao AL_{D1}^{Dir} , em Março de 2012 e Março de 2016

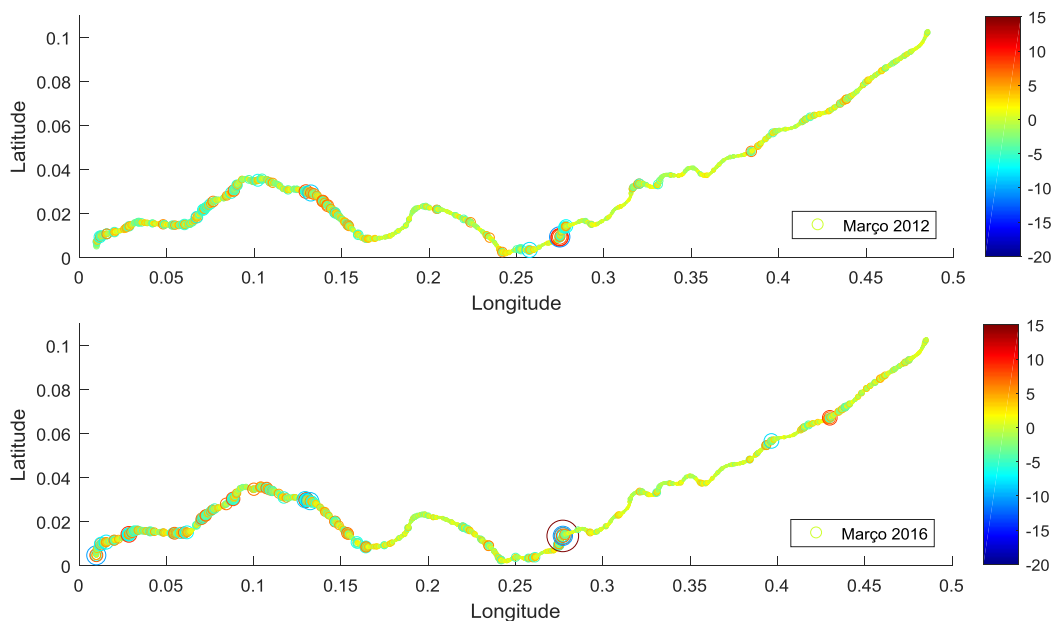


Figura 5.11 - Mapa com valores do registo da EM120 relativamente ao AL_{D1}^{Esq} , em Março de 2012 e Março de 2016

5.3.2 Avaliação do estado da via relativamente ao nível de tolerância de alerta

Após a avaliação geral dos parâmetros geométricos e, em maior detalhe, do nivelamento longitudinal (LL) e do alinhamento (AL), seguiu-se uma análise tendo em conta o desvio padrão desses mesmo parâmetros e da velocidade associada, visto que só assim saberemos se os pontos pertencentes ao troço analisado estão ou não acima dos respetivos valores de tolerância de alerta.

Reuniu-se toda a informação necessária para serem assinalados no mapa todos os pontos que estão acima dos valores de tolerância, tendo em conta a velocidade nesses mesmos pontos. Para isso, foi necessário calcular os valores médios (a média relativa ao valor obtido sobre o carril esquerdo e sobre o direito) do desvio padrão do nivelamento longitudinal D1 e do alinhamento D1, sendo depois utilizados os critérios do Quadro 3.5. É de notar que a EN 13848-5 recomenda um intervalo de valores para a tolerância de alerta desses parâmetros, sendo que os valores estabelecidos na IT.VIA.018 correspondem aos limites superiores desses intervalos.

Nas próximas figuras é indicada a localização dos pontos que estão acima do limite de tolerância de alerta para o valor médio do desvio padrão do nivelamento longitudinal D1 (Figura 5.12) e para o valor médio do desvio padrão do alinhamento D1 (Figura 5.13), sendo possível

comparar a evolução dos parâmetros, visto estar apresentadas as três campanhas selecionadas relativas ao trecho escolhido.

Nas Figuras seguintes, o ponteadado corresponde ao traçado da via-férrea e os pontos coloridos, conforme a barra de cores, correspondem aos valores médios do desvio padrão do nivelamento longitudinal D1 ($\overline{SD}_{LL,D1}$) e do alinhamento ($\overline{SD}_{AL,D1}$) que são superiores aos valores limite de tolerância de alerta.

Da análise às Figuras, mais uma vez, observamos que nos primeiros 25 quilômetros e, em todas as campanhas relativas ao LL_{D1} , temos assinalado os pontos que estão acima dos valores de tolerância de alerta; observa-se também, comparando com a escala de cores, que o número de pontos e a amplitude de alguns desses vão aumentando gradualmente ao longo do tempo, aferidos pelas sucessivas campanhas de auscultação.

Relativamente aos valores do AL_{D1} e, embora se observe um aumento dos valores médios do desvio padrão ao longo de toda a extensão, é notória a concentração de pontos na primeira metade do trecho, começando a notar-se o aparecimento de alguns pontos na segunda metade; quanto a este parâmetro, também se identifica uma evolução com o passar do tempo na alteração das cores de campanha para campanha.

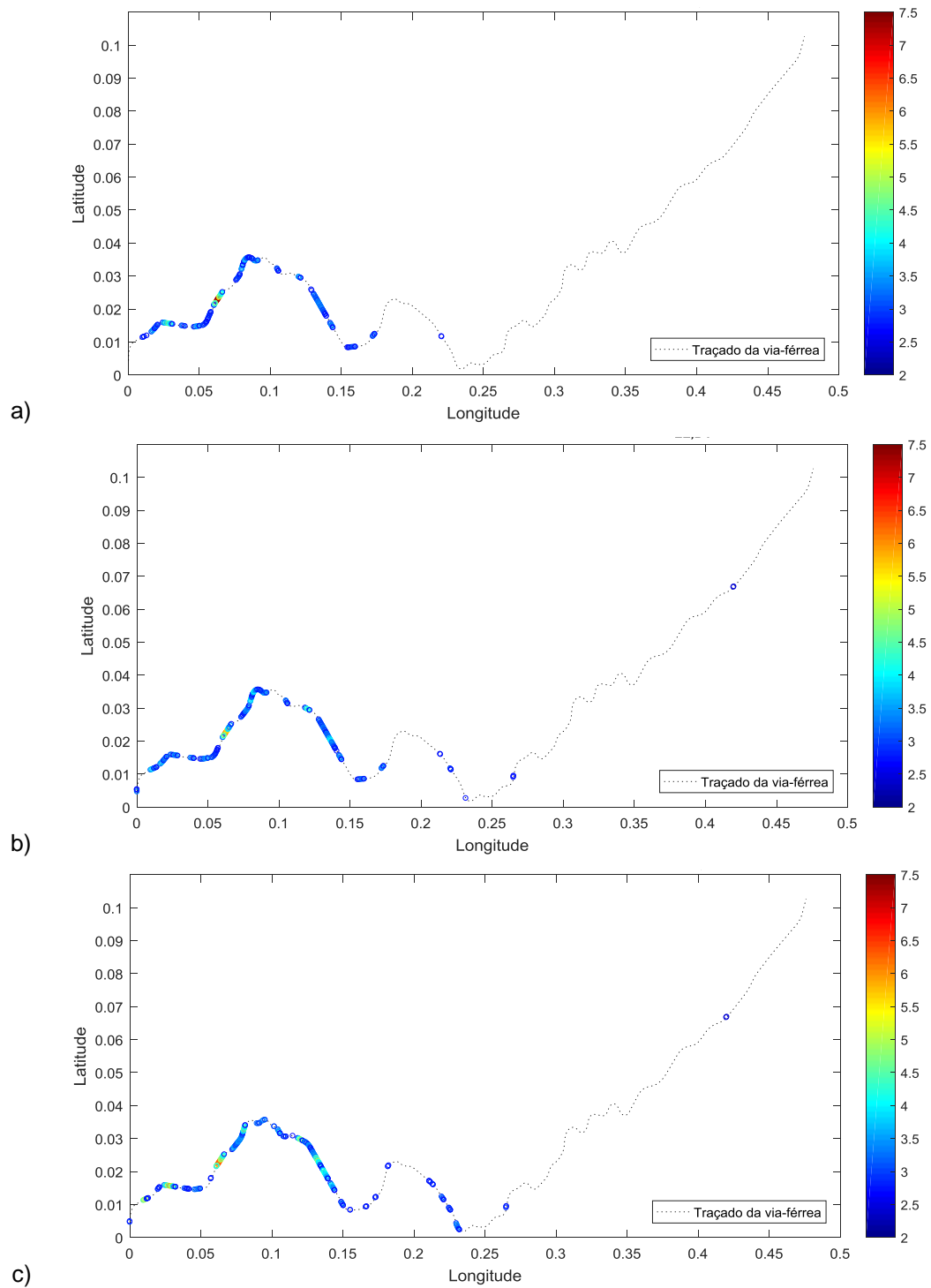


Figura 5.12 – Mapa com localização dos pontos acima do valor de tolerância de alerta para o $\overline{SD}_{LL,D1}$, a) em Março de 2012, b) em Novembro de 2012 e c) em Março de 2016

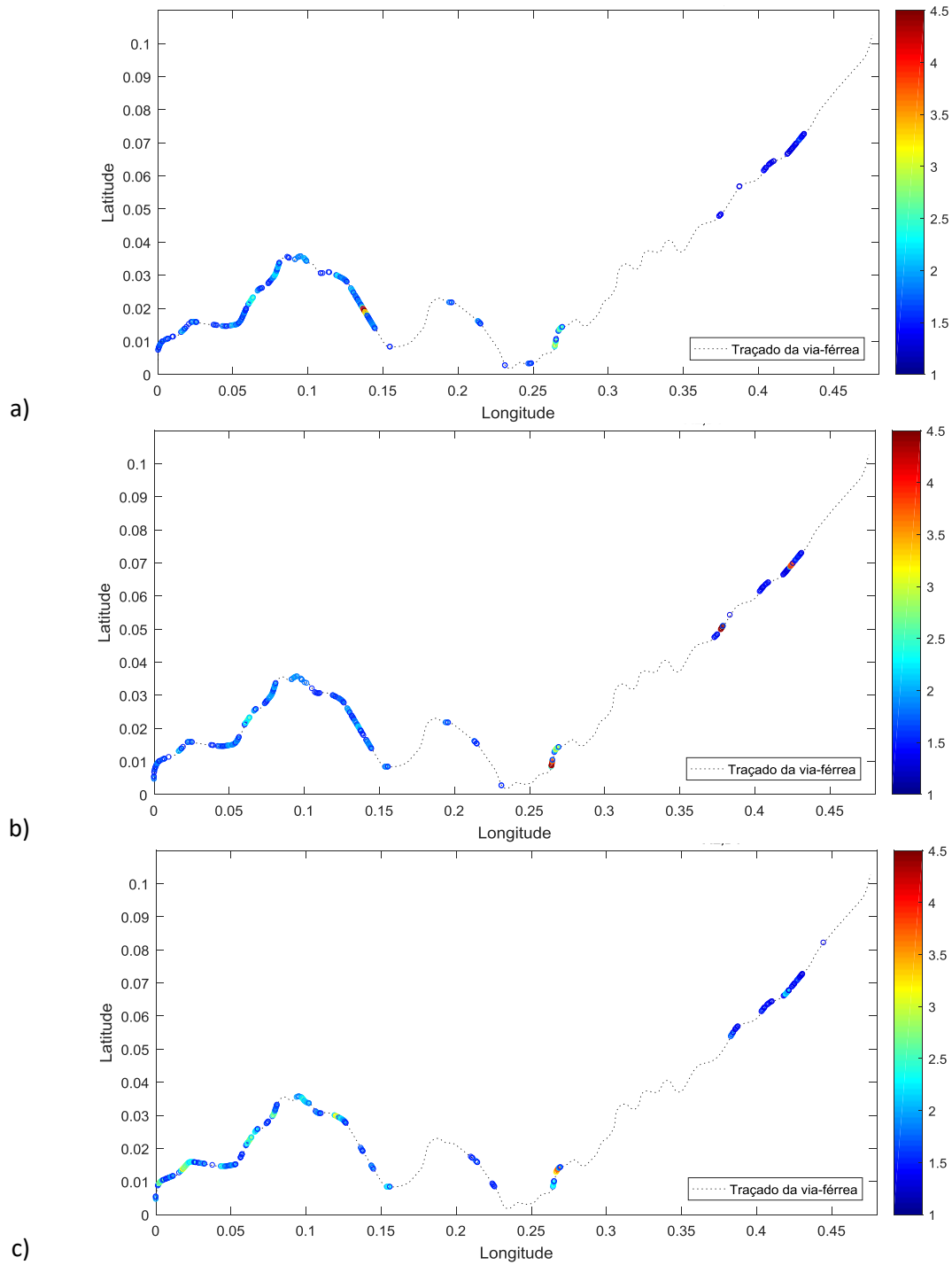


Figura 5.13 – Mapa com localização dos pontos acima do valor de tolerância de alerta para o $\overline{SD}_{AL,D1}$, a) em Março de 2012, b) em Novembro de 2012 e c) em Março de 2016

5.3.3 Avaliação da qualidade geométrica em termos de distribuição estatística

Para avaliar estatisticamente a qualidade geométrica da via-férrea, calculou-se a distribuição acumulada para cada intervalo de velocidade, uma vez que, como já foi dito, os valores de

tolerância são influenciados pela velocidade máxima que o material circulante pode atingir para circular na via-férrea.

São realizados gráficos com a distribuição acumulada do valor médio do desvio padrão do LL_{D1} e AL_{D1} , para as diferentes velocidades praticadas com indicação das classes de qualidade estabelecidos na norma EN 13848-6; no caso do nivelamento longitudinal D1, os valores a ter em conta são os da tabela 2 da EN13848-6, para o alinhamento D1, os valores são os da tabela 3, representadas neste documento nos Quadros 3.10 e 3.11, respetivamente.

Como já foi referido anteriormente, as avaliações da qualidade geométrica da via-férrea têm em conta a velocidade máxima de circulação, contudo e como a velocidade máxima de circulação no troço de via analisado é de 160 km/h apenas será feita a avaliação para o intervalo de velocidades entre 0 e 160km/h, excluindo assim dois intervalos de velocidade: 160 a 230 km/h e velocidades superiores a 230 km/h.

Na Figura 5.14 está representada a distribuição acumulada do valor médio do desvio padrão do LL_{D1} para cada um dos intervalos de velocidade, é também assinalado o limite de alerta, LA. Os valores dos limites de alerta considerados estão indicados no Quadro 3.5.

Repare-se que quanto maior é a velocidade máxima de circulação permitida na via-férrea, menor é o valor médio do desvio padrão a considerar, como seria de esperar. De entre os quatro intervalos de velocidade considerados, o valor limite de alerta varia entre 2,4 e 3,3.

Para a classe de velocidades entre 0 e 40 km/h – correspondendo a 1,1% da extensão do trecho analisado - podemos observar que cerca de 95% dos pontos relativos à campanha de março de 2012 estão acima de 3,3 mm que é o valor limite referenciado na IT.VIA.018 (Quadro 3.5) já, a campanha de março de 2016, o valor médio do desvio padrão é superior em todos os casos a 3,3 mm nos troços com velocidades entre 0 e os 40 km/h. Relativamente à classe de qualidade de via, com este intervalo de velocidades, a via-férrea tem na sua grande maioria classes do tipo D e E, sendo E a classe que indica menor qualidade.

Na classe de velocidades entre os 40 e os 80 km/h é notório que a classe de via já é superior nas duas campanhas, evoluindo assim entre a classe do tipo B e D em ambas as campanhas.

Relativamente ao limite de alerta imposto ($LA = 3 \text{ mm}$), a campanha de Março de 2012 tem cerca de 20% da via, com valores superiores à tolerância de alerta enquanto a campanha de março de 2016 tem cerca de 30%.

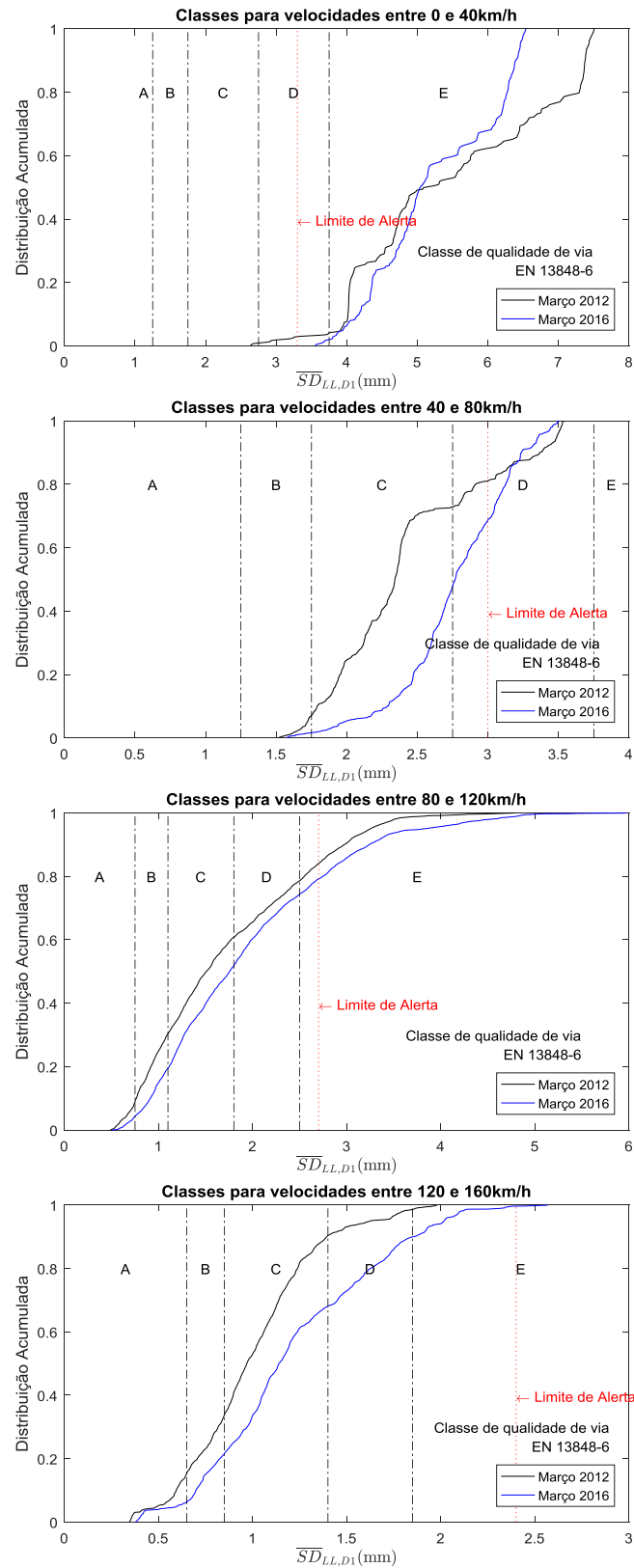


Figura 5.14 - Distribuição Acumulada do $\overline{SD}_{LL,D1}$ das campanhas de Março de 2012 e Março de 2016, de acordo com as velocidades máximas permitidas no percurso, segundo a EN13848-6

É de referir que como nas gamas de velocidades mais baixas, a amostra é representativa de apenas 4,3 % de toda a extensão, da análise à Figura anterior poderiam retirar-se conclusões erradas sobre a globalidade do trecho. Isto é - dado que as curvas de distribuição acumulada se cruzam, esse aspeto podia indicar que houve melhorias relevantes na qualidade geométrica da via que não tinham sido registadas; na prática, este aspeto deve-se ao fato de que como a amostra para essa gama de velocidades mais baixas é relativamente pequena, que qualquer alteração na posição dos carris (como uma intervenção de manutenção muito localizada) poderá ter causado um desvio da curva de distribuição.

Para velocidades entre os 80 e os 120 km/h, a tolerância de alerta estabelecida é de 2,7 mm e, como se observa, a distribuição da qualidade geométrica calculada para as duas campanhas é bastante semelhante, notando-se apenas uma pequena evolução da degradação da qualidade da campanha de 2012 para a de 2016; cerca de 20% da via com este intervalo de velocidades está acima do limite considerado.

A classe de qualidade de via para o nivelamento longitudinal, para esta gama de velocidades, abrange todas as categorias, desde o tipo A até E, ou seja, apresenta uma elevada variabilidade da qualidade geométrica pois tanto apresenta valores correspondentes ao melhor nível de qualidade, A, como correspondentes ao pior nível, E.

Por fim, a via está na sua totalidade dentro da tolerância de alerta para o valor médio do desvio padrão do nivelamento longitudinal D1 para velocidades de circulação entre os 120 e 160 km/h; ambas as campanhas sugerem um comportamento evolutivo uniforme. No entanto, a comparação entre as duas curvas, sugere uma evolução mais acelerada das zonas da via com pior qualidade de geometria (classes do tipo D e E), quando comparadas com as zonas de melhor qualidade (classes do tipo A e C), pelo facto de nessas classes, a translação horizontal da curva relativa a 2016 ter sido mais acentuada.

O Quadro 5.3 é um quadro-resumo com as características descritas em cima, refere também as percentagens aproximadas referentes a cada tipo de classe de qualidade de via.

Relativamente, à análise dos valores médios do desvio padrão para o AL_{D1} , apresentam-se uns gráficos semelhantes aos anteriormente descritos com a diferença do parâmetro geométrico a analisar e os valores do limite de tolerância de alerta; estes gráficos estão apresentados na Figura 5.15 e os valores limite de alerta estão indicados no Quadro 3.5.

Quanto à análise da distribuição acumulada do $\overline{SD}_{AL,D1}$, para a gama de velocidades entre 0 e 40 km/h, tem uma evolução uniforme entre as duas campanhas. A campanha de março de 2012 tem acima do valor LA, cerca de, 40%, enquanto em março de 2016 tem 65%. As classes de qualidade de via para este intervalo de velocidades encontra-se entre C e E.

Quadro 5.3 - Quadro-resumo sobre os gráficos de distribuição acumulada do $\overline{SD}_{LL,D1}$

Campanha	Velocidade máxima de circulação (km/h)	Limite de alerta	% de pontos da via acima do valor limite	Classe de qualidade de via
Março 2012	$V \leq 40$	3,3	95	C,D,E
	$40 < V \leq 80$	3,0	20	B,C,D
	$80 < V \leq 120$	2,7	20	A,B,C,D,E
	$120 < V \leq 160$	2,4	0	A,B,C,D,E
Março 2016	$V \leq 40$	3,3	100	D,E
	$40 < V \leq 80$	3,0	30	B,C,D
	$80 < V \leq 120$	2,7	15	A,B,C,D,E
	$120 < V \leq 160$	2,4	1	A,B,C,D,E

Relativamente ao intervalo de valores para velocidades entre os 40 e os 80 km/h, cerca de 25% dos valores da campanha estão acima da tolerância de alerta em março de 2012 e 40% para março de 2016. As classes de qualidade de via estão entre B e D. Tendo em conta que o declive da curva de março de 2012 é mais acentuado e que o declive da campanha de março de 2016 é suave comparativamente à outra, faz com que as duas curvas se cruzem, isto pode dar-se devido ao fato da amostra para esta gama de velocidades ser pouco representativa.

Para a gama de velocidades entre 80 a 120 km/h, cerca de 20% de ambas as campanhas está acima da tolerância de alerta determinado. Para estas velocidades, as curvas tomam posições distintas à medida que o valor médio do desvio padrão aumenta; assim, e considerando o tipo de classe parece que limita a alternância das campanhas, senão vejamos: inicialmente, a classe do tipo A apenas contempla 1 a 2% da campanha de março de 2016; a classe do tipo B abrange cerca de 18% de ambas as campanhas reparando-se pela posição adotada das curvas que a via tem melhor qualidade na campanha de março de 2016; na classe imediatamente a seguir, C as campanhas invertem de posição tendo a campanha de março de 2012 melhor qualidade que a outra campanha, envolvendo cerca de 30% das campanhas; abrangendo as classes do tipo D e E, contabilizando cerca de 40% das campanhas, temos novamente a campanha de março de 2016 com uma qualidade superior; por fim, os restantes 10% voltam a indicar que a campanha de março de 2016 está pior em termos de $\overline{SD}_{AL,D1}$.

O fato de se verificarem estas alterações na posição das duas curvas pode significar ou não que a via esteja melhor ou pior mas sim, a possibilidade de ter ocorrido um erro no registo dos valores.

No intervalo de velocidades de 120 a 160km/h, cerca de 20% e 25%, respetivamente para as campanhas de março de 2012 e 2016, estão acima da tolerância de alerta imposto.

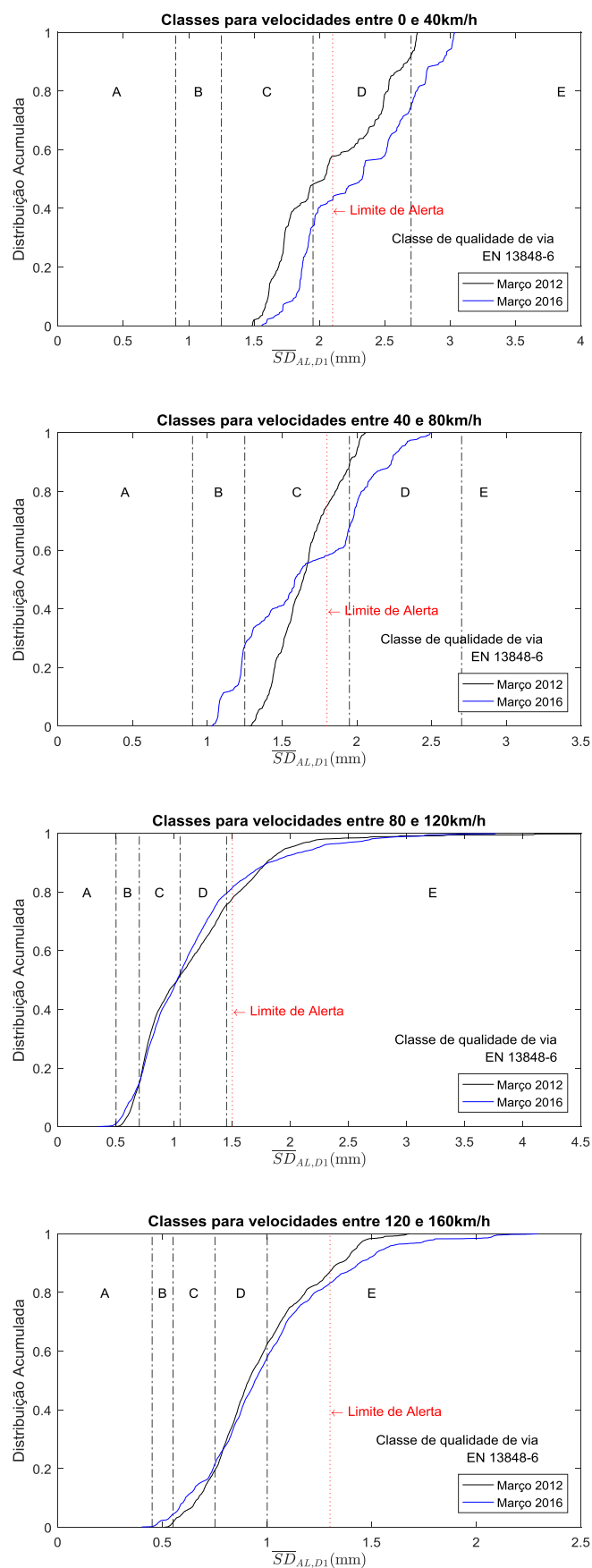


Figura 5.15 - Distribuição Acumulada do $\overline{SD}_{AL,D1}$ das campanhas de Março de 2012 e Março de 2016, de acordo com as velocidades máximas permitidas no percurso, segundo a EN13848-6

Ambas as campanhas têm um declive semelhante mas por volta dos 30% verifica-se uma intersecção das curvas que demonstra que houve uma melhoria na qualidade geométrica nos valores iniciais da campanha de março de 2016.

No Quadro 5.4, está resumida a avaliação descrita nos parágrafos anteriores.

Quadro 5.4 - Quadro-resumo sobre os gráficos de distribuição acumulada do $\overline{SD}_{AL,D1}$

Campanha	Velocidade máxima de circulação (km/h)	Limite de alerta	% de pontos da via acima do valor limite	Classe de qualidade de via
Março 2012	$V \leq 40$	2,1	40	C,D,E
	$40 < V \leq 80$	1,8	25	B,C,D
	$80 < V \leq 120$	1,5	20	A,B,C,D,E
	$120 < V \leq 160$	1,3	20	B,C,D,E
Março 2016	$V \leq 40$	2,1	65	C,D,E
	$40 < V \leq 80$	1,8	40	A,B,C,D
	$80 < V \leq 120$	1,5	15	A,B,C,D,E
	$120 < V \leq 160$	1,3	25	B,C,D,E

Para entender, em termos numéricos, a distribuição das duas campanhas em termos de caracterização da via relativamente à classe de qualidade de via foram elaboradas as tabelas seguintes: a primeira relativa ao valor médio do desvio padrão do LL_{D1} (Quadro 5.5) e a segunda ao valor médio do desvio padrão do AL_{D1} (Quadro 5.6).

Quadro 5.5 - Percentagem da via-férrea associada a cada classe de qualidade de via para o $\overline{SD}_{LL,D1}$

	Classe de qualidade de via	V ≤ 40	40 < V ≤ 80	80 < V ≤ 120	120 < V ≤ 160
Extensão (km)		0,5 km	1,6 km	35,6 km	11,8 km
Distribuição (%)		1,1 %	3,2 %	71,9 %	23,8 %
Março 2012	A	0 %	0 %	9 %	15 %
	B	0 %	7 %	21 %	19 %
	C	1 %	66 %	30 %	56 %
	D	3 %	27 %	19 %	9 %
	E	96 %	0 %	21 %	1 %
	Total	100 %	100 %	100 %	100 %
Março 2016	A	0 %	0 %	4 %	6 %
	B	0 %	2 %	16 %	16 %
	C	0 %	46 %	32 %	46 %
	D	2 %	52 %	22 %	22 %
	E	98 %	0 %	26 %	10 %
	Total	100 %	100 %	100 %	100 %

Quadro 5.6 - Percentagem da via-férrea associada a cada classe de qualidade de via para o $\overline{SD}_{AL,D1}$

	Classe de qualidade de via	V ≤ 40	40 < V ≤ 80	80 < V ≤ 120	120 < V ≤ 160
Extensão (km)		0,5 km	1,6 km	35,6 km	11,8 km
Distribuição (%)		1,1 %	3,2 %	71,9 %	23,8 %
Março 2012	A	0 %	0 %	0 %	0 %
	B	0 %	88 %	15 %	4 %
	C	48 %	12 %	36 %	16 %
	D	45 %	0 %	24 %	42 %
	E	7 %	0 %	25 %	38 %
	Total	100 %	100 %	100 %	100 %
Março 2016	A	0 %	0 %	1 %	0 %
	B	0 %	0 %	14 %	4 %
	C	34 %	28 %	36 %	17 %
	D	41 %	40 %	29 %	37 %
	E	25 %	32 %	20 %	42 %
	Total	100 %	100 %	100 %	100 %

Os Quadros anteriores indicam as percentagens aproximadas para cada classe de qualidade de via consoante a velocidade de circulação máxima permitida, permitindo quantificar e qualificar cada uma delas.

Na Figura 5.16 está presente a distribuição das classes de qualidade de via, para o troço analisado segundo a gama de velocidades para o nivelamento longitudinal D1. Na Figura 5.17, por sua vez, está apresentada a distribuição das classes de qualidade de via, segundo a gama de velocidades para o alinhamento D1.

Estas Figuras são a representação gráfica mais detalhada da informação apresentada nos Quadros 5.5 e 5.6. Note-se que devido à amostra ter pouco significado nas gamas de velocidades mais baixas, a sua interpretação gráfica deve ser considerada pouco representativa do caso de estudo, independentemente de que parâmetro se tratar.

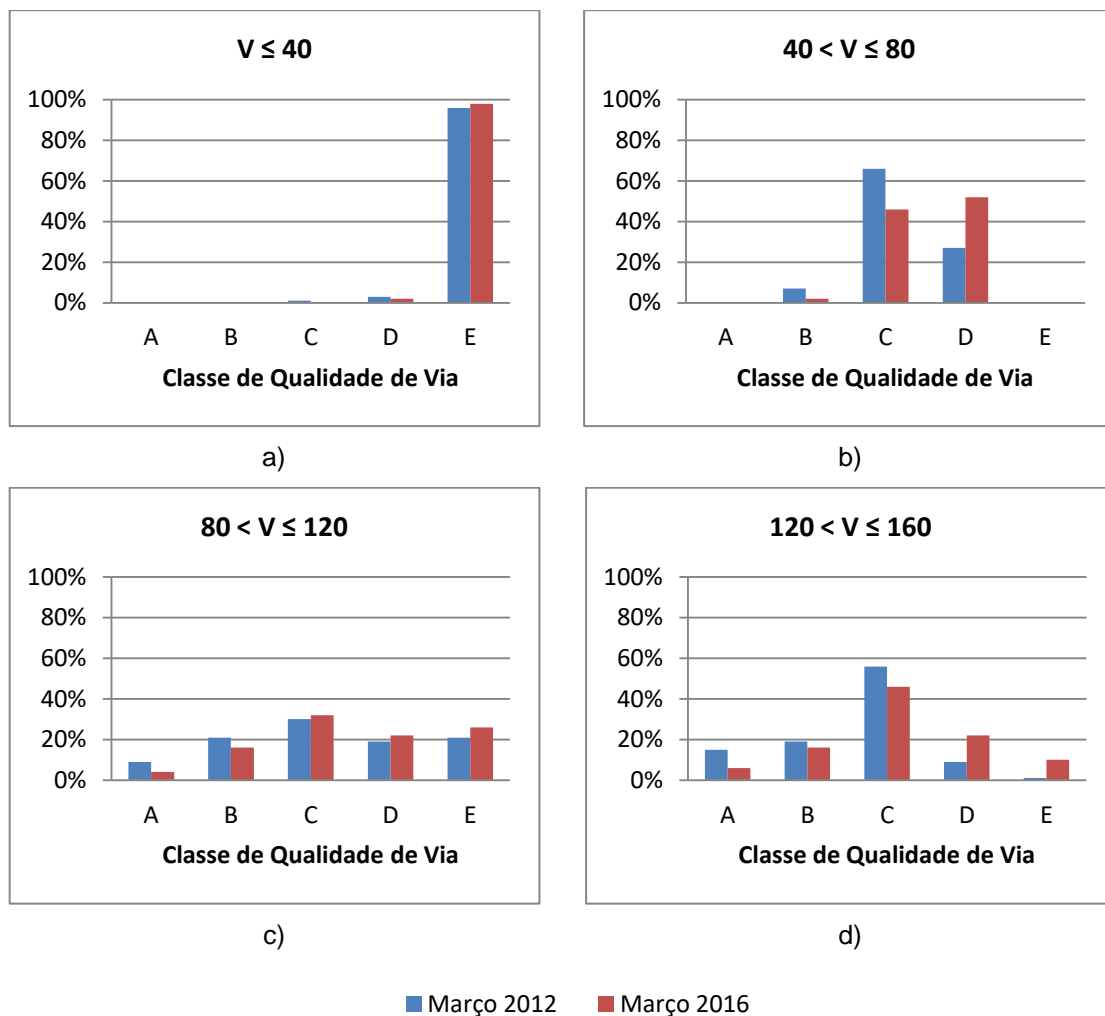


Figura 5.16 - Distribuição das classe de qualidade de via (EN 13848-6) relativamente ao valor médio do desvio padrão do LL_{D1} segundo as gamas de velocidades

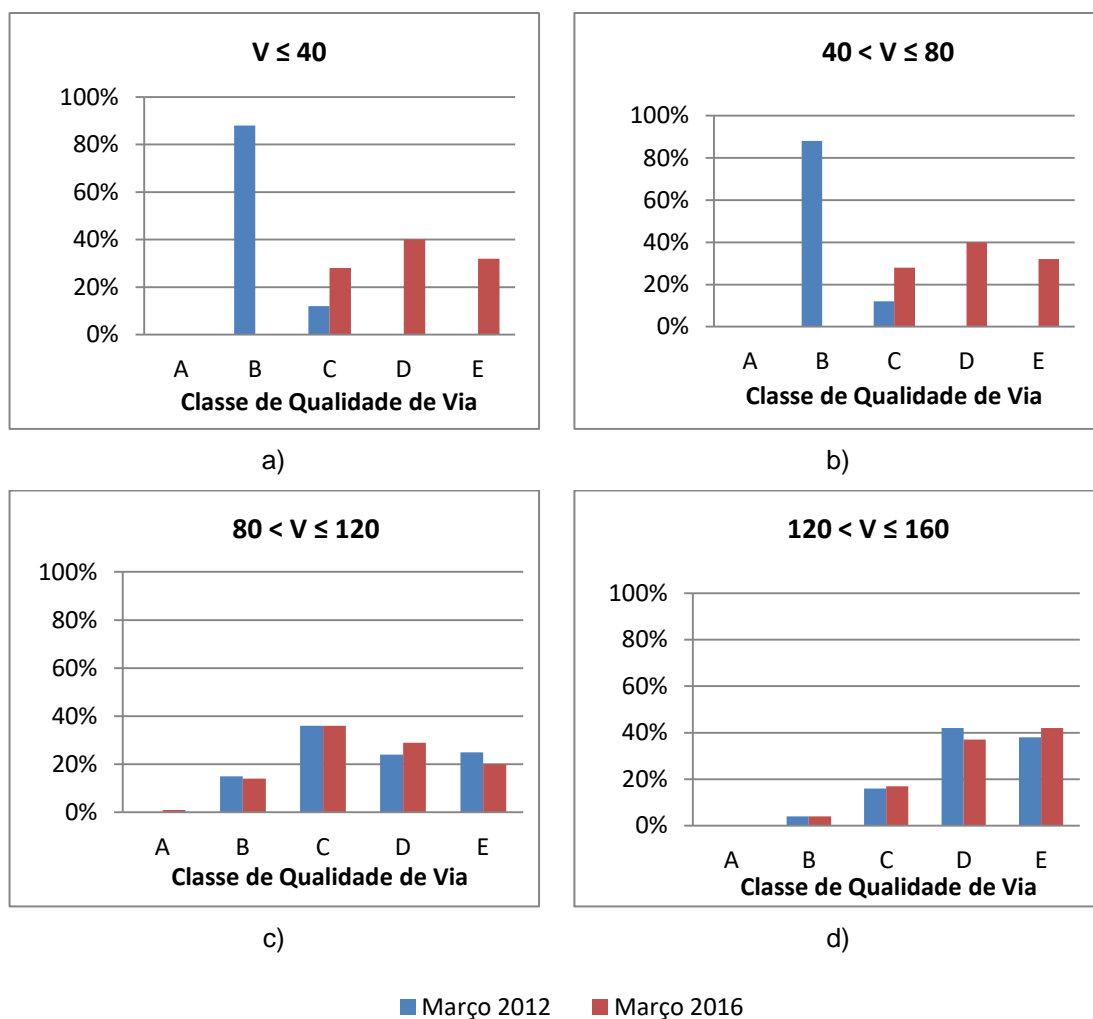


Figura 5.17 - Distribuição das classe de qualidade de via (EN 13848-6) relativamente ao valor médio do desvio padrão do AL_{D1} segundo as gamas de velocidades

Após o processamento dos dados em termos da função de distribuição acumulada, pode visualizar-se através da execução de um mapa realizado pela função desenvolvida para o MATLAB e descrita no capítulo anterior, os troços que a linha possui para cada tipo de classe de qualidade de via; é utilizado um esquema de cores da qual cada cor representa uma classe distinta. A EN 13848-6 define os valores limite para os valores médios do desvio padrão quer para o nivelamento longitudinal D1, quer para o alinhamento D1; os Quadros 3.10 e 3.11 transcrevem os valores limite que a norma estabelece.

A Figura 5.18 diz respeito aos mapas relativos à classe da qualidade geométrica da via para o nivelamento longitudinal D1, especialmente nas três campanhas selecionadas para ser feita a avaliação. Na observação de todas as campanhas é de notar que parece ser possível agrupar a via em três trechos, na parte inicial e final do troço possui uma classe de qualidade de via inferior ao trecho intermédio.

Ao acompanhar a linha nas diferentes campanhas são de notar algumas zonas em que a classe da qualidade da via diminui, mostrando assim a evolução gradual da degradação da linha. Repare-se que à medida que o tempo vai passando, também, é de salientar que o

número de zonas com a classe mais baixa de qualidade seja superior às contabilizadas na primeira campanha. Também parece evidente, que quanto melhor for a classe de qualidade de via, mais lentamente a linha vai reduzindo de qualidade; no caso contrário, quanto menor é a qualidade, mais rápida é a evolução para uma classe ainda menor.

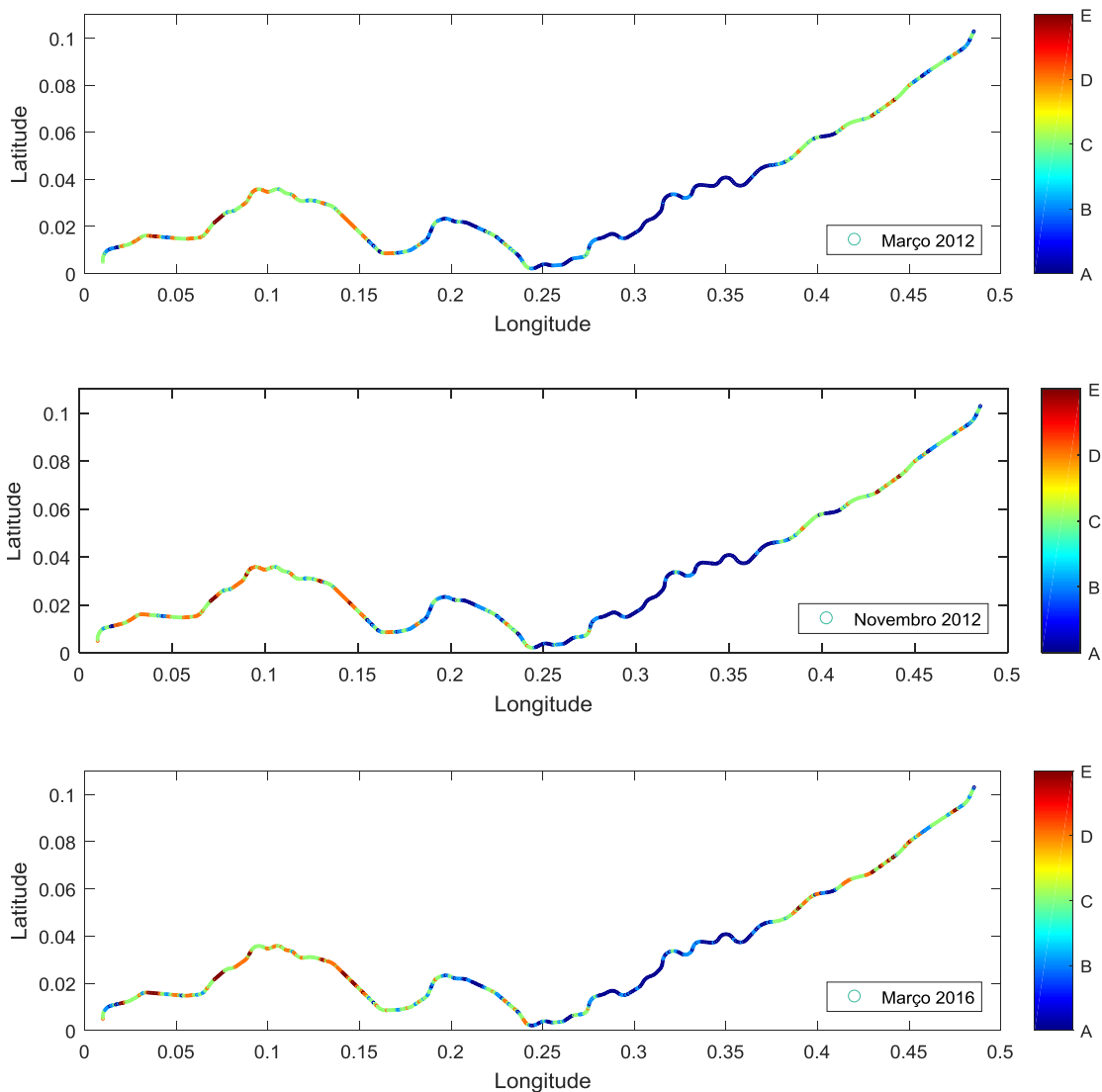


Figura 5.18 – Mapa com a classificação da qualidade geométrica para o LL_{D1} , em cada campanha, segundo a EN 13848

Relativamente à classe de qualidade geométrica da via para o valor médio do AL_{D1} , as Figuras seguintes mostram claramente que comparando com as classes de qualidade geométrica da via para o nivelamento longitudinal D1, tem de uma forma geral, uma qualidade geométrica inferior, como é possível identificar nas Figuras 5.19.

Do mesmo modo que na classificação para o LL_{D1} , também no AL_{D1} se verifica que podemos dividir em três trechos a extensão da via a ser analisada.

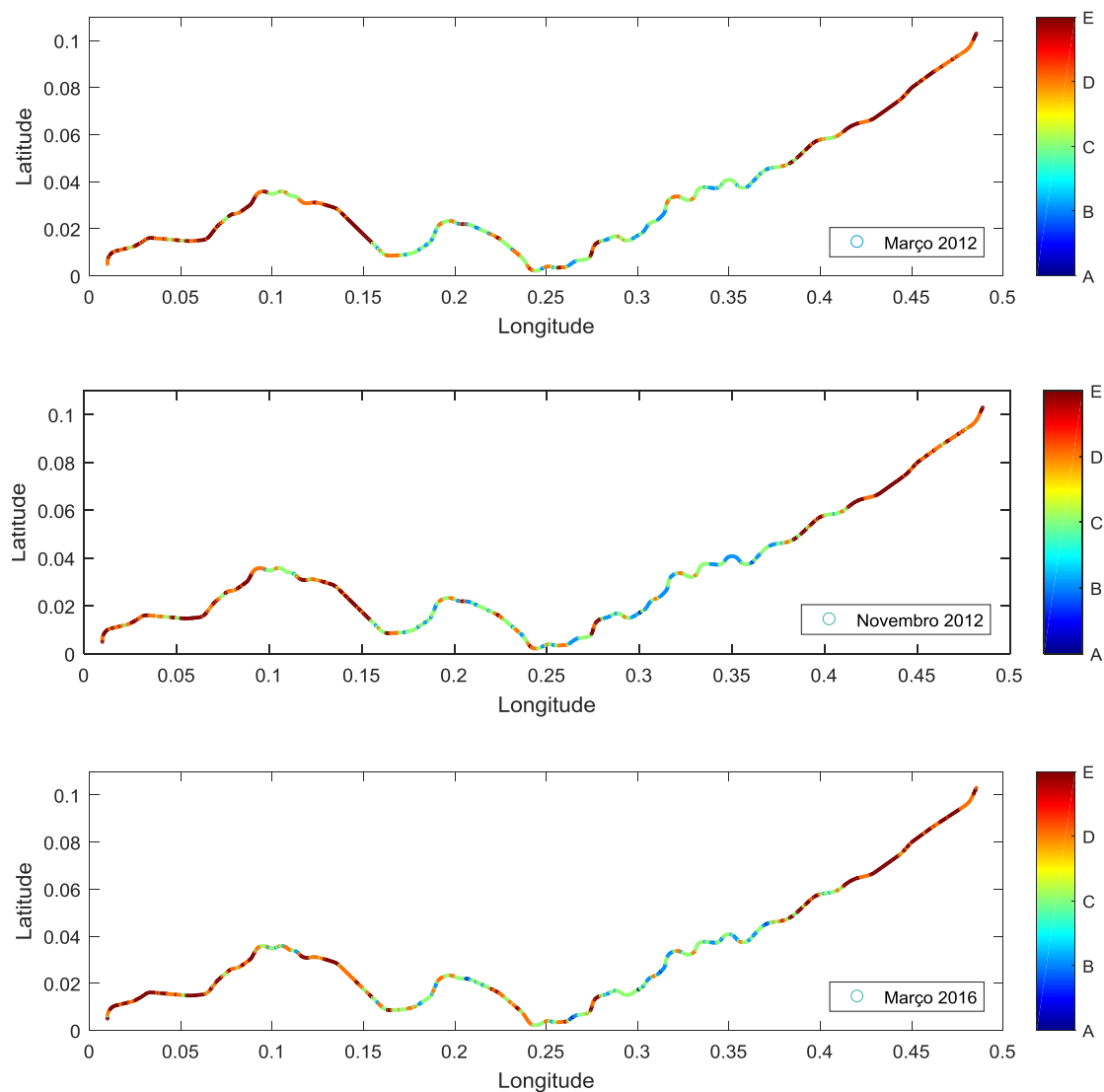


Figura 5.19 – Mapa com a classificação da qualidade geométrica para o AL_{D1} , em cada campanha segundo a EN 13848

Observa-se que tal como foi anteriormente referido, no início e no fim do troço se identifica facilmente zonas com classes de qualidade geométrica de via inferiores ao trecho intermédio; é bem visível que estes troços têm uma classe do tipo D ou E e que com o passar do tempo a tendência é a via passar a ser de classe do tipo E.

Já o trecho intermédio possui um tipo de classe de qualidade geométrica melhor do que a restante extensão, variando entre os três tipos de classe de melhor qualidade (A, B e C).

É de sublinhar que na campanha de março de 2012, as classes de qualidade geométrica da via variam entre B e E, enquanto nas campanhas posteriores já envolvem a classe do tipo A, evidenciando que devem ter ocorrido melhorias não registadas na qualidade geométrica da via.

A análise visual sobre o parâmetro do alinhamento D1 é muito mais clara e perceptível a alteração de campanha para campanha, visto que o alinhamento D1 é um parâmetro que sofre alterações mais rapidamente.

5.3.4 Evolução da condição de via ao longo de todo o trecho da via-férrea

A análise da evolução da geometria da via-férrea é usualmente efetuada com base nos valores do desvio padrão de alguns parâmetros geométricos, dividindo a linha em segmentos de 200 m e calculando o valor do desvio padrão para cada um desses trechos.

No trabalho aqui presente, no sentido de se poder obter mais informação sobre o comportamento de evolução da geometria das vias-férreas e no seguimento de estudos anteriores (Paixão, 2014), optou-se por analisar os valores de desvio padrão utilizando no cálculo a mesma extensão de via de 200 m. No entanto, em vez de se segmentar a via em trechos de 200 m e atribuir um valor do desvio padrão a cada um, calculou-se o valor do desvio padrão de um modo contínuo, ou seja, utilizando uma janela móvel de 200 m. Por sua vez, a IP calcula o desvio padrão de 200 metros considerando uma janela fixa; mais à frente são analisados os resultados para ambas as situações.

Para visualizar a evolução da via-férrea calculou-se o desvio padrão do nivelamento longitudinal D1 para as três campanhas selecionadas, Março e Novembro de 2012 e Março de 2016, permitindo assim comparar entre si as campanhas.

Seria de esperar que as campanhas tivessem uma evolução gradual mas da análise à Figura 5.20, observamos que em certos Pk's não é isso que acontece; por exemplo, entre os Pk's 5 e 7 repare-se que a campanha de Março de 2012 tem um valor de desvio padrão superior às outras campanhas, contrariamente ao que se deveria esperar, pois não houve indicação de nenhuma intervenção à via de manutenção pesada.

A evolução do desvio padrão para o nivelamento longitudinal D1 está presente no Anexo C apresentada em segmentos de 10 km por gráfico e calculado segundo janelas móveis de 75 e 200m.

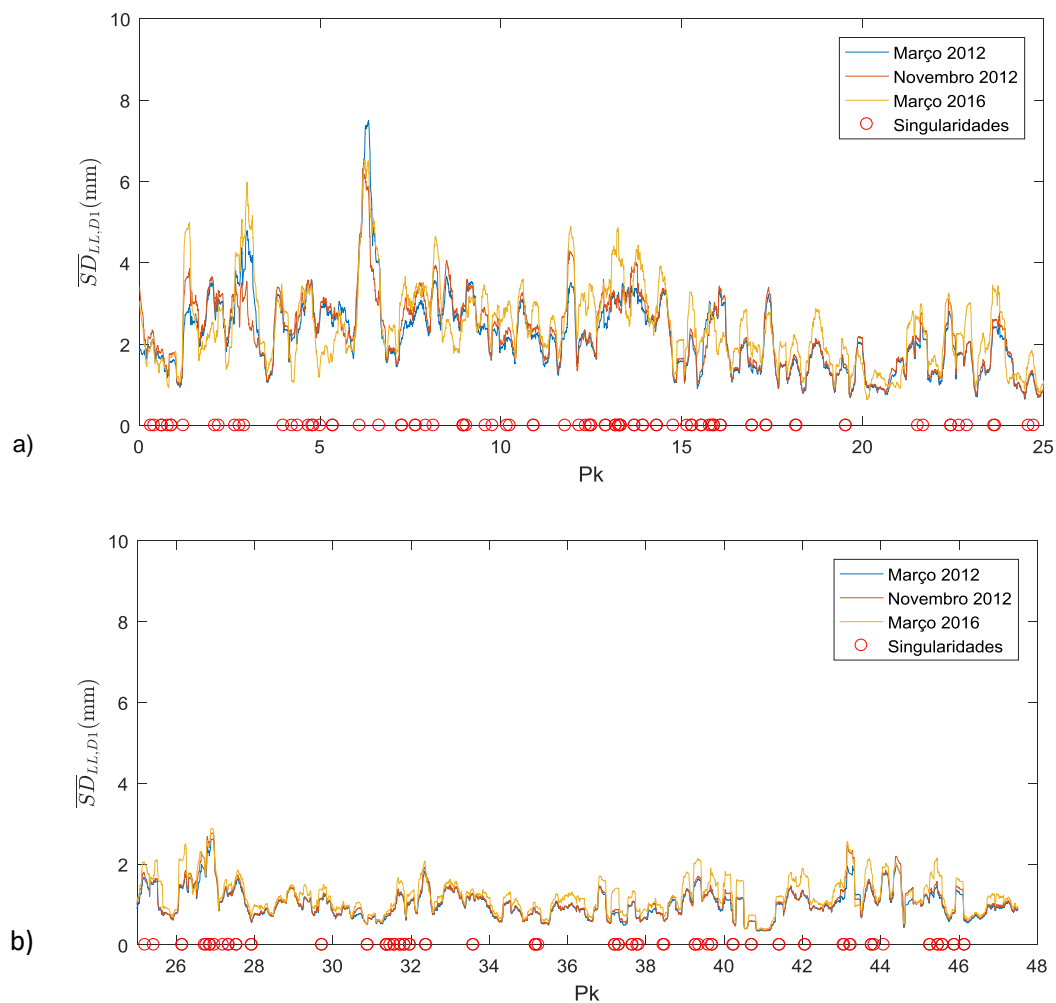


Figura 5.20 - Evolução do $\overline{SD}_{LL,D1}$ para um desvio padrão de 200m, a) entre o Pk 0 e o Pk 25 e b) entre o Pk 25 e o Pk 48

Dado que ao analisar os gráficos com um enorme volume de dados, não permite ter uma percepção bem definida acerca dos valores apresentados, apresentam-se os diagramas de caixa na Figura 5.21, onde mostra a variação dos valores médios do desvio padrão do nivelamento longitudinal D1 de cada campanha e as diferenças entre esses mesmos valores entre as várias campanhas sucessivas.

Considerando uma amostra com o mesmo número de pontos para as três campanhas, dos diagramas de caixa retiramos a informação acerca da amostra representada, do número de outliers ou valores atípicos, do valor da mediana, máximo e mínimo e, ainda o valor que corresponde ao percentil 25 e 75; a informação sobre os valores do $\overline{SD}_{LL,D1}$ e as diferenças entre campanhas está registada nos Quadros 5.7 e 5.8.

Como podemos observar, no que diz respeito quer aos valores médios do desvio padrão do LL_{D1} , quer à diferença entre campanhas desses mesmos valores, a mediana vai aumentando à

medida que se avança nas campanhas e, o mesmo se verifica com os valores relativos ao percentil 25 e 75, verificado pela análise à Figura 5.21.

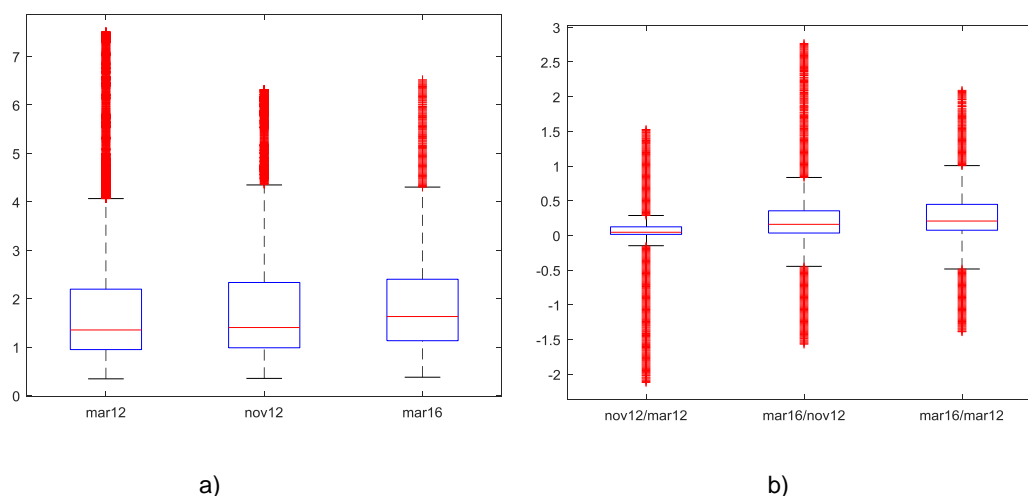


Figura 5.21 – Diagramas de caixa para a) Valores de $\overline{SD}_{LL,D1}$ de cada campanha e b) Diferenças entre os valores $\overline{SD}_{LL,D1}$ entre campanhas sucessivas (em mm)

Quadro 5.7– Informação do diagrama de caixa para os valores de $\overline{SD}_{LL,D1}$ de cada campanha

	março de 2012	novembro de 2012	março de 2016
Mediana	1,3533	1,4036	1,6306
Máximo	7,5016	6,3179	6,5356
Mínimo	0,3444	0,3533	0,3777
Percentil 75	2,1955	2,3332	2,4001
Percentil 25	0,9483	0,9856	1,1316
Nº. de Outliers	2732	1231	5766
Nº. de pontos	190000		

Quadro 5.8 - Informação do diagrama de caixa para a diferença entre os valores de $\overline{SD}_{LL,D1}$ entre campanhas sucessivas

	março de 2012 a novembro de 2012	novembro de 2012 a março de 2016	março de 2012 a março de 2016
Mediana	0,0452	0,1596	0,2071
Máximo	1,5289	2,7806	2,1012
Mínimo	-2,1197	-1,5678	-1,3885
Percentil 75	0,1238	0,3546	0,4473
Percentil 25	0,0149	0,0342	0,0747
Nº. de Outliers	22291	22666	17115
Nº. de pontos	190000		

O cálculo do desvio padrão através de um modo contínuo, ou seja, considerando uma janela móvel, faculta uma visão mais clara sobre a variação do mesmo ao longo da extensão da via

em análise, permitindo que se observe com mais detalhe a sua variação e não apenas o que se passa pontualmente sob uma zona de influência de 200 m.

Dado que a IP utiliza o método de janela “fixa”, apresenta-se em seguida a comparação entre o cálculo do desvio padrão considerando uma janela móvel e janela ‘fixa’ de 200 metros.

Na Figura 5.22 está apresentado o desenvolvimento do valor para o desvio padrão com janela fixa de 200 metros; a informação que podemos retirar é que em todas as campanhas temos um aglomerado de pontos, não conseguindo distinguir a evolução entre cada ponto.

Quando se sobrepõe os dois métodos é óbvio que vamos encontrar a sobreposição de um método no outro pois os valores calculados são os mesmos. Porém, o fato de não considerar uma janela móvel perde-se muita informação acerca dos pontos calculados e omitem-se algumas situações relativamente mais gravosas, como se pode observar pela Figura 5.23, onde se pode ver o desvio padrão relativo à campanha de março de 2012.

Assim como na Figura 5.23 relativa apenas a março de 2012, também na Figura 5.24, onde estão presentes as três campanhas, se verifica a sobreposição de vários pontos sobre as linhas do desvio padrão com janela móvel, contudo não acompanha o progresso de todos os picos, perdendo assim eventuais desenvolvimentos entre picos.

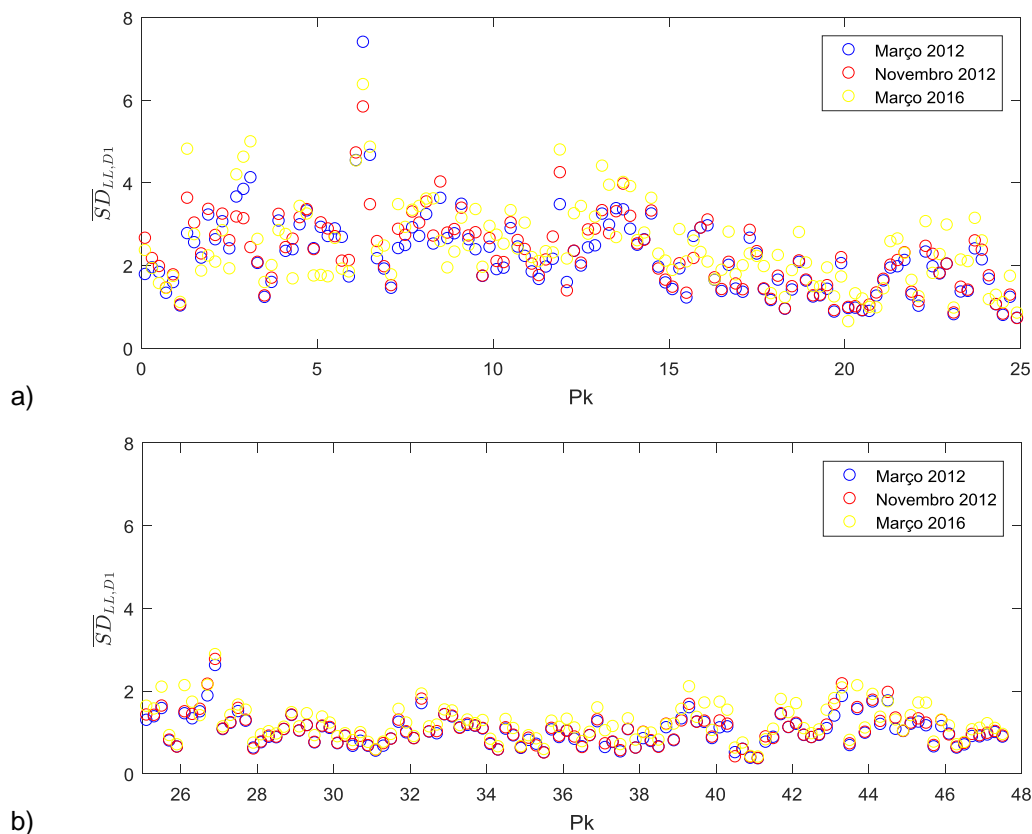


Figura 5.22 - Desvio padrão com janela de 200 metros

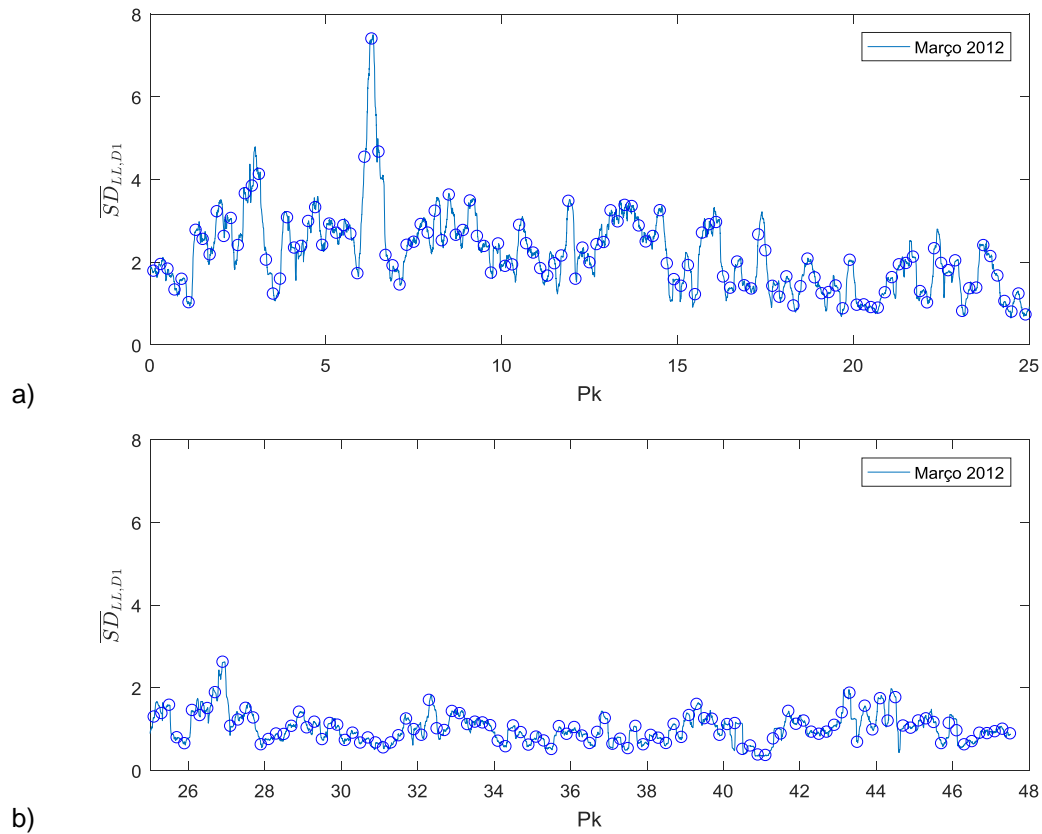


Figura 5.23 - Comparação do desvio padrão utilizando os dois métodos de cálculo com janelas de 200 metros da campanha de março de 2012

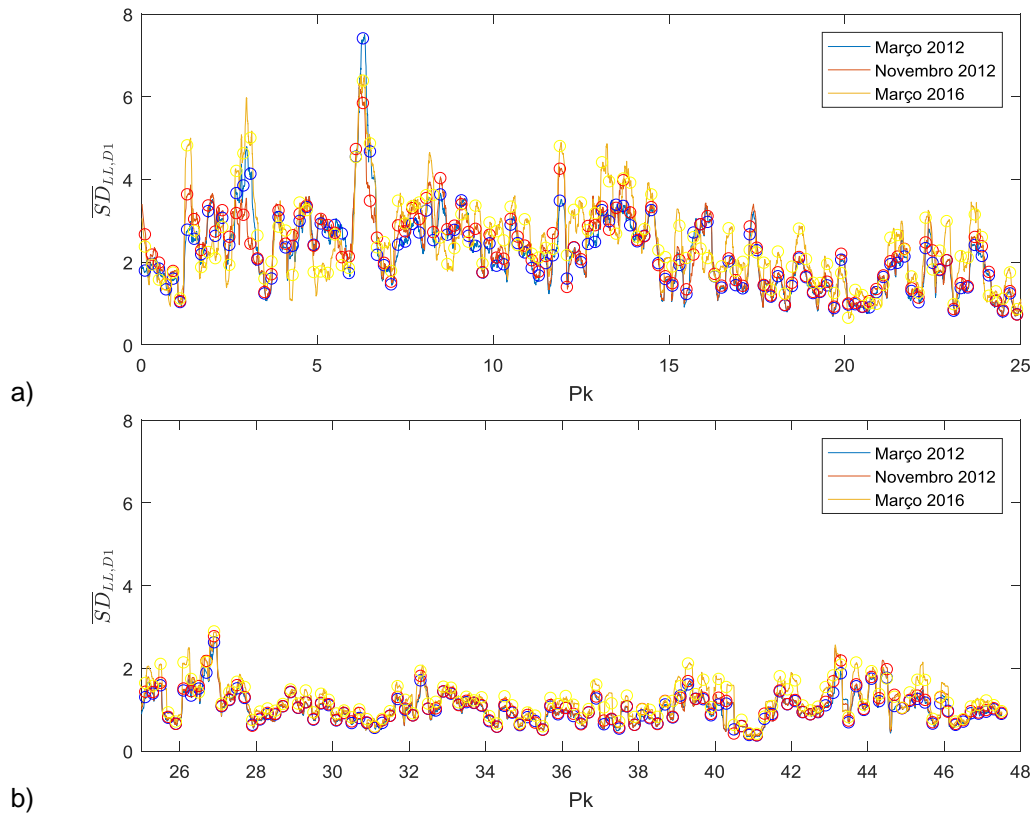


Figura 5.24 - Comparação do desvio padrão utilizando os dois métodos de cálculo com janelas de 200 metros para as três campanhas

Para se determinar a média do valor médio do desvio padrão para o LL_{D1} , beneficiou-se dos gráficos de distribuição acumulada apresentados anteriormente no ponto 5.3.3 onde se determinou para cada intervalo de velocidades máximas de circulação permitida, o valor médio do desvio padrão, ou seja, intersetando a linha horizontal dos 50 % com a curva das campanhas.

Como foi descrito no ponto 5.3, as gamas de velocidades mais baixas, a sombreado no Quadro 5.9 vão ser descartadas, uma vez que dado a dimensão da amostra ser reduzida comparativamente às restantes gamas, os valores podem conduzir a conclusões inúteis pouco representativas da via-férrea do caso de estudo.

Quadro 5.9 - Média do valor médio do desvio padrão para o LL_{D1} (mm)

Velocidade de circulação	Campanhas		
	Março 2012	Novembro 2012	Março 2016
$V \leq 40$	5,038	3,898	5,113
$40 < V \leq 80$	2,341	2,493	2,768
$80 < V \leq 120$	1,507	1,578	1,755
$120 < V \leq 160$	0,969	1,009	1,140

É de notar que quanto maior é a velocidade de circulação máxima permitida, menor é o valor da média do desvio padrão do nivelamento longitudinal D1. Repare-se, também, que à medida que o tempo passa, esse valor aumenta porque a via-férrea vai-se degradando com o acumular de tráfego que circula, resultando no aumento da amplitude dos defeitos e da sua variabilidade.

Depois desta análise ao desvio padrão para uma janela de 200 metros compara-se esta com uma janela de intervalo mais apertado e, para isso recorreu-se ao cálculo do valor médio do desvio padrão para uma janela móvel de 75 metros e fez-se a comparação entre as duas janelas. Da observação à Figura 5.25 é evidente na zona onde existem picos na janela de 200 metros se desenvolvem de igual modo na janela de 75 metros mas com a nota de que se subdividem em dois ou mais picos; embora com resultados semelhantes, o valor médio do desvio padrão com intervalo de 75 metros tem valores superiores, gerando um gráfico com uma evolução de maior amplitude vertical e com os defeitos mais evidenciados. O desenvolvimento do desvio padrão do troço para ambas as janelas encontra-se no Anexo C.

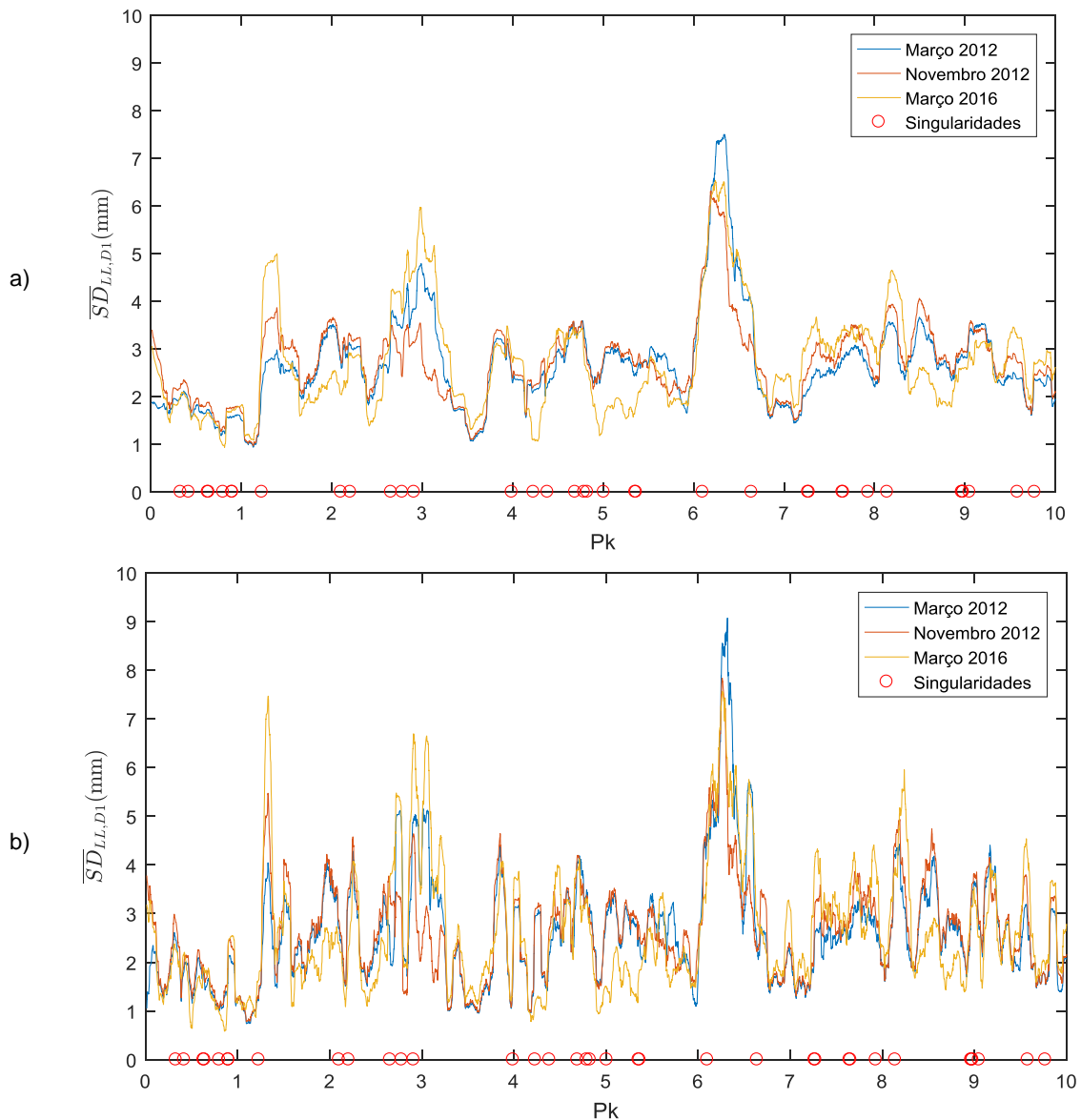


Figura 5.25 – Evolução do valor médio do desvio padrão para a) janela móvel de 200 metros e b) janela móvel para 75 metros

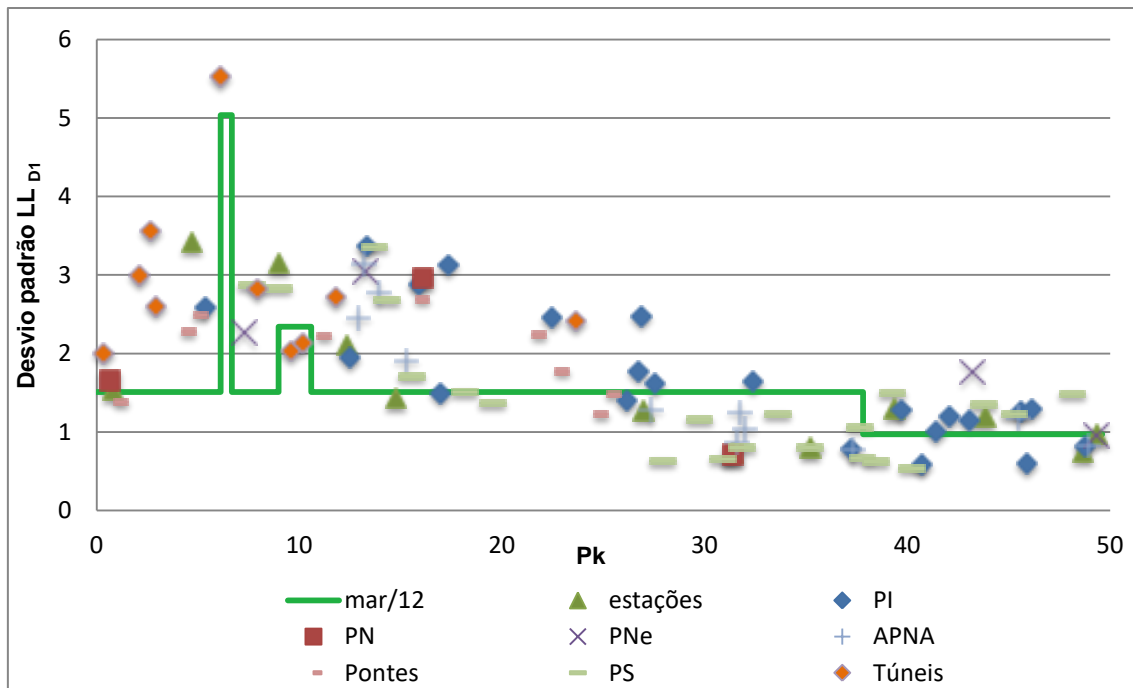
5.3.5 Evolução da condição de via ao longo das singularidades

Existem diversos estudos que sugerem que as singularidades da via-férrea são pequenos trechos da via que evidenciam uma evolução da degradação da qualidade geométrica mais rápida [Ubalde, 2004; Paixão, 2014]. No presente caso de estudo, para averiguar esse comportamento nas singularidades avaliou-se a sua evolução da qualidade geométrica tendo em conta os mesmos parâmetros que foram analisados para toda a extensão escolhida, fazendo-se uma posterior comparação.

Em termos gerais, para avaliar a evolução da geometria das singularidades calculou-se, para cada uma, o valor médio do desvio padrão do nivelamento longitudinal D1, agrupando as análises consoante a velocidade máxima de circulação e considerando os tipos de singularidade, indicados no Quadro 5.1 que a linha atravessa, como apresentado na Figura 5.26 e na Figura 5.27, para as campanhas de março de 2012 e março de 2016, respetivamente.

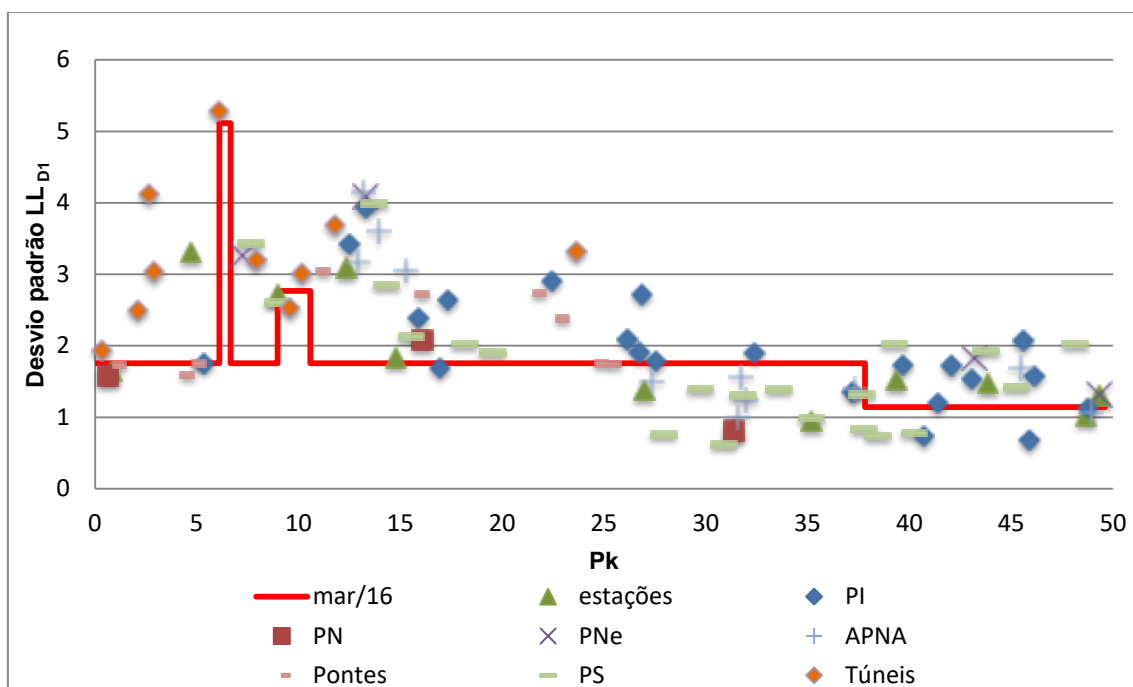
As linhas contínuas a verde (Figura 5.26) e vermelho (Figura 5.27) assinalam o valor médio do desvio padrão do nivelamento longitudinal D1, indicado no Quadro 5.9. Cada nível da linha relativa à média do desvio padrão do LL_{D1} , em ambas as campanhas, diz respeito a uma gama de velocidades, sendo que para gamas de velocidades superiores temos um valor de desvio padrão mais baixo; totalizando assim, quatro valores distintos assim como são quatro gamas de velocidade.

Pela observação dos dois gráficos seguintes verifica-se que o valor do desvio padrão para cada singularidade é quase sempre superior à média do desvio padrão para toda a extensão de linha, o que salienta que a qualidade geométrica da via-férrea nas zonas com singularidades é, na sua maioria, pior do que em plena via; dos casos que estão abaixo da média há um que está em maior número e que diz respeito às passagens superiores. Este resultado sugere que as passagens superiores não estejam associadas ao comportamento de degradação da qualidade geométrica de vias-férreas, pois as passagens superiores não representam alterações na subestrutura ou superestrutura da via. No entanto, como em alguns casos específicos, tais como na construção ou na reparação de novas passagens superiores, podem ocorrer trabalhos na via e, no âmbito do presente estudo, inicialmente foi decidido incluir estas estruturas na lista de singularidades de via a analisar. Estas observações aplicam-se para os resultados das duas campanhas apresentadas.



Legenda: PI – Passagem Inferior; PN – Passagem de Nível; PNe – Passagem de Nível encerrada; AP_{NA} – Atravessamento Pedonal não autorizado; PS – Passagem Superior.

Figura 5.26 - Desvio padrão nas singularidades comparado com a média, consoante a velocidade, em março de 2012



Legenda: PI – Passagem Inferior; PN – Passagem de Nível; PNe – Passagem de Nível encerrada; AP_{NA} – Atravessamento Pedonal não autorizado; PS – Passagem Superior.

Figura 5.27 - Desvio padrão nas singularidades comparado com a média, consoante a velocidade, em março de 2016

5.4 Cálculo das taxas de variação anual

Para uma melhor percepção da evolução da condição da via são calculadas as taxas de variação anual; o seu cálculo é baseado nos valores médios de desvio padrão para o nivelamento longitudinal D1 entre campanhas.

A taxa de variação anual (TVA) tem como unidade de medida *mm/ano*, permitindo assim comparar campanhas entre si, mesmo com intervalos de tempo distintos; a TVA é calculada através da seguinte expressão:

$$TVA = \frac{[\overline{SD}_{LLD1}(\text{última camp.}) - \overline{SD}_{LLD1}(\text{anterior à última camp.})] \times 12}{N^{\circ}. \text{ de meses (entre camp.)}} \quad (3)$$

Em seguida são apresentados os resultados referentes à taxa de variação anual para toda a via e, posteriormente serão avaliados os resultados relativos às singularidades. No seguimento dos resultados apresentados no ponto 5.3, espera-se que os valores de TVA relativos às singularidades sejam sempre superiores aos valores de TVA da via-férrea na sua generalidade.

5.4.1 Taxa de variação anual para toda a via

Neste ponto, são determinadas três taxas de variação: a primeira referente à evolução entre as campanhas de Novembro de 2012 e Março de 2012, a segunda entre Março de 2016 e Novembro de 2012 e, por último a taxa de variação entre Março de 2016 e Março de 2012; estes resultados são apresentados no Quadro 5.10.

A taxa de variação anual entre campanhas sucessivas foi determinada a partir do valor médio determinado anteriormente, através das curvas de distribuição acumulada para cada campanha, utilizando a fórmula (3), descrita em cima.

Quadro 5.10 – Taxa de variação anual do \overline{SD}_{LLD1}

Velocidade de circulação	TVA (mm/ano)		
	março de 2012 a novembro de 2012	novembro de 2012 a março de 2016	março de 2012 a março de 2016
80 < V ≤ 120	0,107	0,053	0,062
120 < V ≤ 160	0,060	0,039	0,043

Da análise ao Quadro 5.10, repare-se que à medida que se avança nas campanhas, observamos uma redução da TVA; para a gama de velocidades entre 80 e 120 km/h, no período de oito meses (março de 2012 a novembro de 2012) tem uma taxa de 0,107 mm/ano, sendo superior ao valor das outras taxas comparadas (0,053 mm/ano e 0,062 mm/ano), o mesmo acontece para a outra gama de velocidades considerada. Estes resultados podem ter por base de que a via possa ter sido intervencionada anteriormente a 2012 e depois inspecionada em março de 2012, verificando-se uma evolução gradual mais rápida nos primeiros meses e depois com tendência a estabilizar nos anos seguintes.

Tal como anteriormente, foi realizada a análise através de diagramas de caixa (Figura 5.28a) para a TVA da via, salientando o fato de que no cálculo da TVA entre novembro e março de 2012, a sua evolução foi mais acentuada e menos uniforme, tendo estabilizado quando se compara com períodos semelhantes entre março de 2016 e novembro de 2012 (40 meses) e entre março de 2016 e 2012 (48 meses); esta informação é retirada devido à quantidade e grande amplitude dos valores atípicos do diagrama.

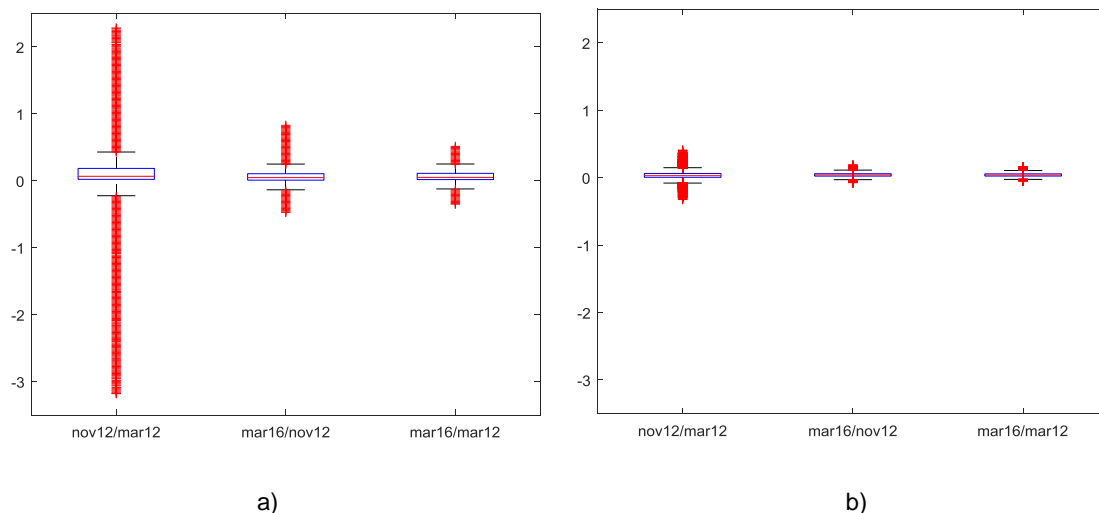


Figura 5.28 – Diagramas de caixa tendo em conta a) Toda a extensão da via-férrea e b) Trecho da via-férrea com desenvolvimento semelhante ao longo das campanhas

Em grande parte da extensão da linha analisada, verificou-se alguma variabilidade na evolução entre as curvas de cada campanha aquando do cálculo e representação gráfica do desvio padrão para o LL_{D1} na Figura 5.20, isto é, a evolução do aumento da degradação da qualidade geométrica nem sempre seguia a ordem de aumento do valor do desvio padrão que seria de esperar: março de 2012, novembro de 2012 e março de 2016. No entanto, foi possível encontrar um trecho da linha onde tal caso se verificou; assim, é representado na Figura 5.29 um trecho de cerca de 13 km de extensão onde a evolução do LL_{D1} é geralmente uniforme de campanha para campanha, verificando-se que quando a segunda inspeção foi feita logo após oito meses da primeira, temos valores próximos e, depois, quando se efetuou a última campanha já observamos valores acima da penúltima campanha e com amplitude muito

semelhante em todos os picos. Para isso, selecionou-se apenas os valores do desvio padrão do LL_{D1} para esse intervalo de Pk's e efetuou-se novamente uma análise através de diagramas de caixa; o resultado final encontra-se na Figura 5.28 b). Verifica-se que a redução da extensão em análise reduziu significativamente a dispersão e o número de valores atípicos. As informações sobre os seguintes diagramas de caixa estão presentes nos Quadros 5.11 e 5.12. Repare-se que em ambos os casos, a mediana tem sempre um valor positivo, indicando que a via se degrada para pior.

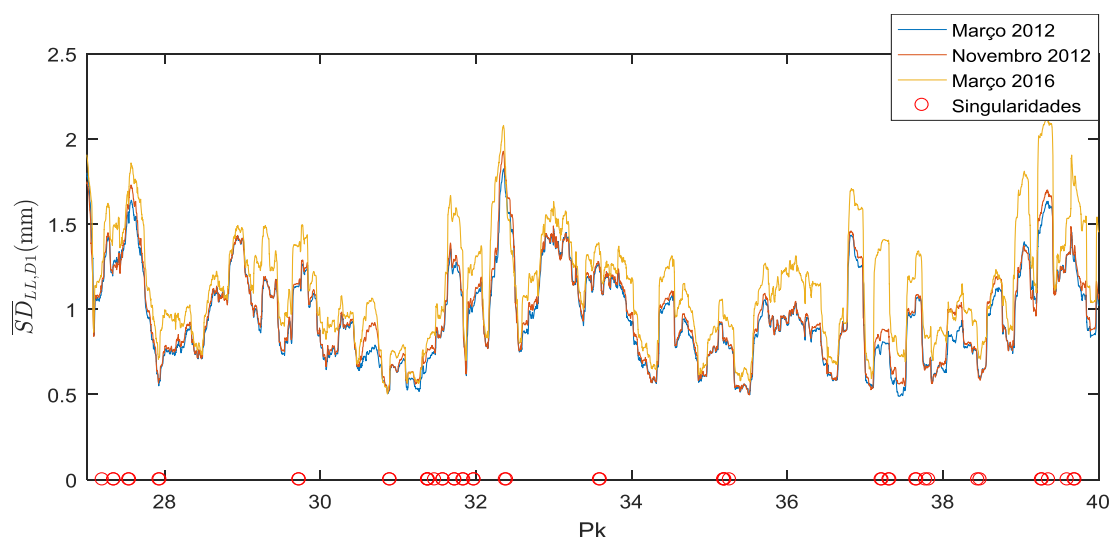


Figura 5.29 – Trecho da via-férrea com desenvolvimento semelhante do LL_{D1} ao longo das campanhas

Quadro 5.11 – Informação do diagrama de caixa para toda a extensão da via

	março de 2012 a novembro de 2012	novembro de 2012 a março de 2016	março de 2012 a março de 2016
Mediana	0,0678	0,0479	0,0518
Máximo	2,2933	0,8342	0,5253
Mínimo	-3,1795	-0,4703	-0,3471
Percentil 75	0,1856	0,1064	0,1118
Percentil 25	0,0224	0,0103	0,0187
Nº. de Outliers	22291	22666	17115
Nº. de pontos	190000		

Quadro 5.12 – Informação do diagrama de caixa para um trecho da via (Pk 27 a Pk 40)

	março de 2012 a novembro de 2012	novembro de 2012 a março de 2016	março de 2012 a março de 2016
Mediana	0,0299	0,0406	0,0395
Máximo	0,4074	0,1870	0,1525
Mínimo	-0,3235	-0,0721	-0,0440
Percentil 75	0,0626	0,0591	0,0571
Percentil 25	0,0056	0,0236	0,0241
Nº. de Outliers	3238	3771	3314
Nº. de pontos	50001		

Na Figura 5.30 apresenta-se a taxa de variação anual ao longo dos pontos quilométricos para as campanhas entre março de 2012 e março de 2016; no Anexo D será apresentada uma versão mais detalhada do gráfico.

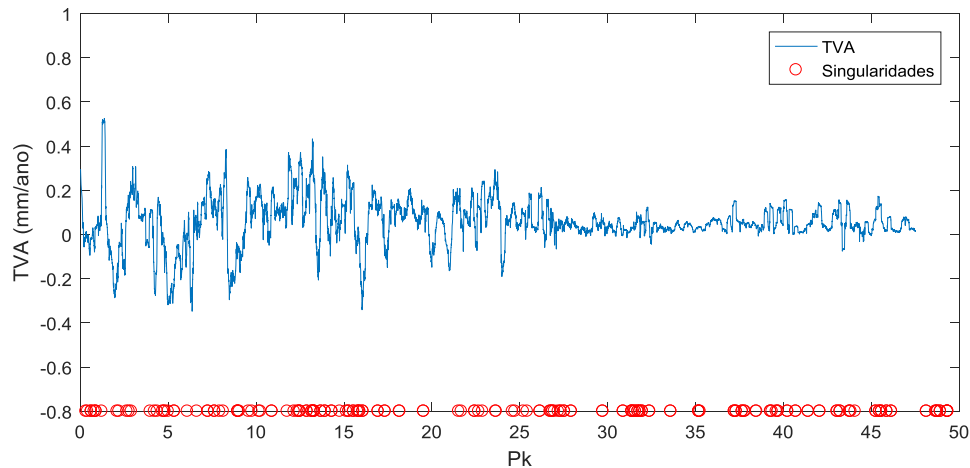


Figura 5.30 – Taxa de variação anual

5.4.2 Taxas de variação anual nas singularidades

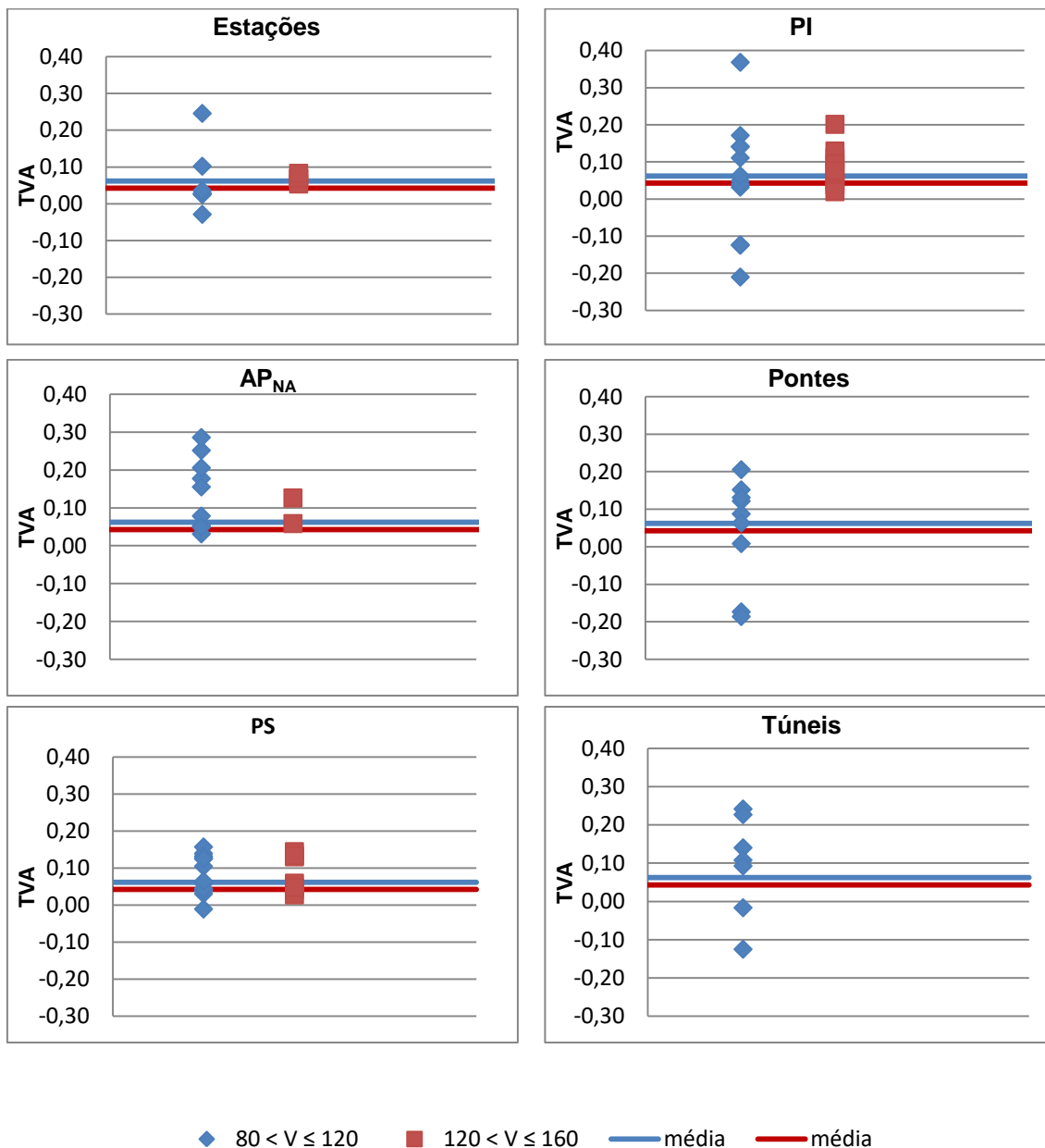
Para avaliar a taxa de variação anual das singularidades foi realizada uma análise semelhante; recorreu-se à mesma fórmula, enunciada em (3) e foram elaborados os seguintes gráficos da Figura 5.31, onde cada um deles representa um tipo de singularidade e estão assinalados os valores médios da TVA ao longo da extensão de cada singularidade, segundo a gama de velocidades mais representativa. Para ser uma análise com algum fundamento, foram selecionadas as singularidades com uma amostra significativa, descartando assim dois dos oito tipos de singularidades assinalados.

Os gráficos mostram a cores distintas as duas gamas de velocidades consideradas, onde a azul é a gama entre 80 e 120 km/h e a vermelho, a gama entre 120 e 160 km/h; os vários pontos representam o valor da TVA para cada uma das singularidades na via e a linha contínua assinala a média da TVA para toda a extensão do troço escolhido.

Todas as pontes e túneis assinalados circulam apenas com velocidades entre os 80 e 120 km/h e, daí não existir nenhum ponto com o registo da TVA para a gama superior a essa.

Para analisar melhor a distribuição da TVA para cada singularidade recorreu-se uma vez mais aos diagramas de caixa para cada singularidade (Figura 5.32) e foi registada a sua informação no Quadro 5.13.

Os valores da mediana para a TVA para cada singularidade variam entre 0,05 e 0,10 mm/ano, observando que os túneis têm valores superiores a este intervalo já que a TVA se situa entre os 0,11 e os 0,24 mm/ano.



Legenda: PI – Passagem Inferior; PN – Passagem de Nível; PNe – Passagem de Nível encerrada; AP_{NA} – Atravessamento Pedonal não autorizado; PS – Passagem Superior.

Figura 5.31 - Média da taxa de variação anual, em mm/ano, para as duas gamas de velocidades e o valor das taxas em cada uma das singularidades, entre as campanhas de março de 2016 e março de 2012

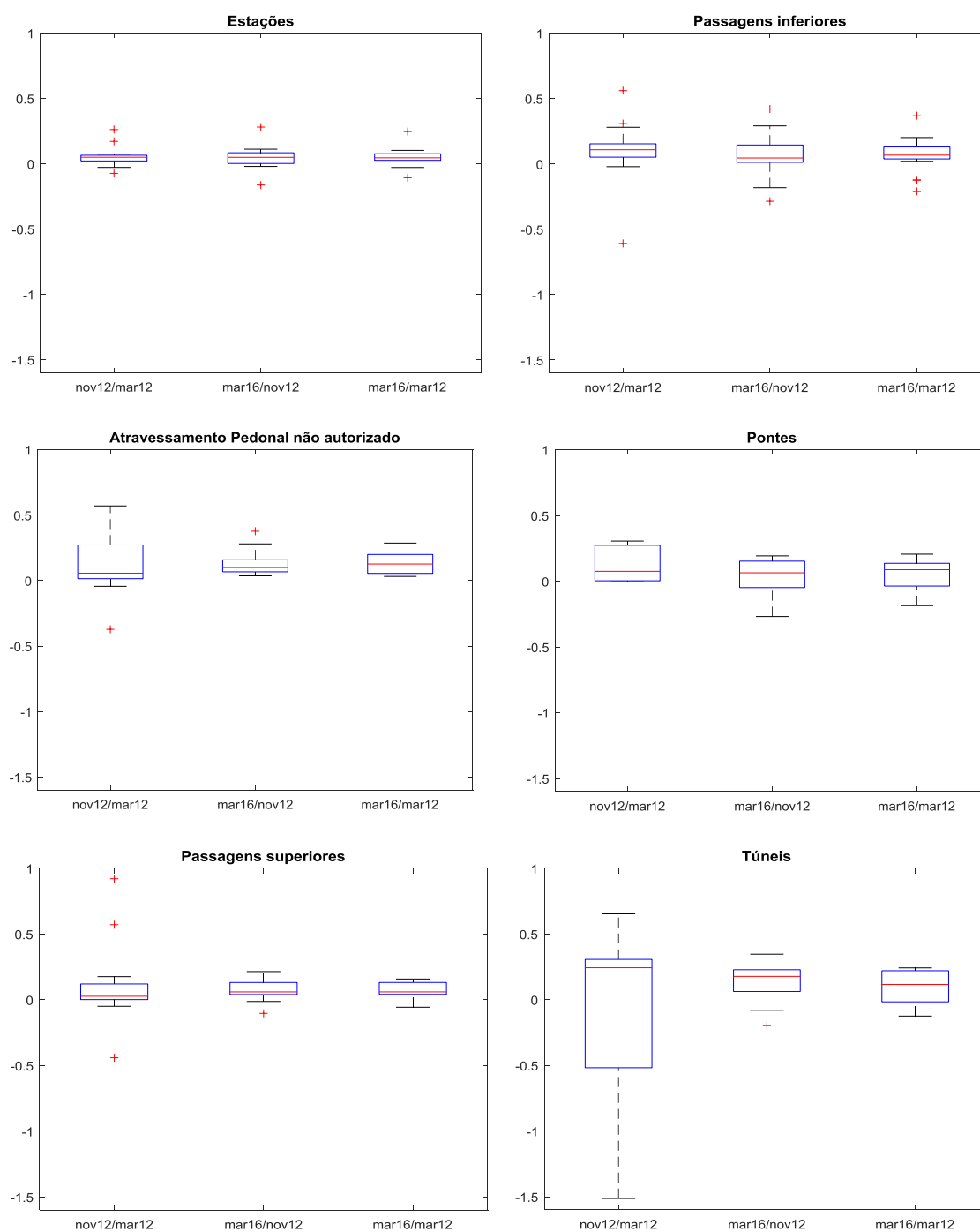


Figura 5.32 – Taxa de variação anual para cada singularidade

Quadro 5.13 - Informação do diagrama de caixa para cada singularidade (TVA em mm/ano)

		março de 2012 a novembro de 2012	novembro de 2012 a março de 2016	março de 2012 a março de 2016
Estações	Mediana	0,0495	0,0489	0,0449
	Máximo	0,2614	0,2804	0,2458
	Mínimo	-0,0738	-0,1632	-0,1075
	Percentil 75	0,0646	0,0836	0,0763
	Percentil 25	0,0212	0,0020	0,0258
	Nº. de Outliers	3	2	2
	Nº. de pontos	12		
Passagem Inferior	Mediana	0,1082	0,0452	0,0669
	Máximo	0,5601	0,4197	0,3682
	Mínimo	-0,6082	-0,2857	-0,2101
	Percentil 75	0,1534	0,1443	0,1294
	Percentil 25	0,0514	0,0119	0,0380
	Nº. de Outliers	3	2	4
	Nº. de pontos	22		
Atravessamento Pedonal não autorizado	Mediana	0,0530	0,0993	0,1264
	Máximo	0,5700	0,3768	0,2862
	Mínimo	-0,3725	0,0360	0,0315
	Percentil 75	0,2718	0,1582	0,1990
	Percentil 25	0,0144	0,0666	0,0547
	Nº. de Outliers	1	1	0
	Nº. de pontos	11		
Pontes	Mediana	0,0754	0,0641	0,0878
	Máximo	0,3055	0,1927	0,2057
	Mínimo	-0,0038	-0,2687	-0,1856
	Percentil 75	0,2735	0,1527	0,1366
	Percentil 25	0,0033	-0,0484	-0,0367
	Nº. de Outliers	0	0	0
	Nº. de pontos	9		
Passagem Superior	Mediana	0,0263	0,0595	0,0596
	Máximo	0,9206	0,2142	0,1575
	Mínimo	-0,4416	-0,1036	-0,0571
	Percentil 75	0,1199	0,1311	0,1312
	Percentil 25	-0,4416	0,0395	0,0406
	Nº. de Outliers	3	1	0
	Nº. de pontos	21		
Túneis	Mediana	0,2429	0,1771	0,1155
	Máximo	0,6531	0,3462	0,2417
	Mínimo	-1,5136	-0,1980	-0,1250
	Percentil 75	0,3065	0,2278	0,2201
	Percentil 25	-0,5184	0,0621	-0,0165
	Nº. de Outliers	0	1	0
	Nº. de pontos	10		

Em virtude de uniformizar a taxa de evolução anual para todas as singularidades, considerou-se o diagrama de caixa para todas as singularidades ao mesmo tempo (Figura 5.33), produzindo apenas um diagrama de caixa para cada intervalo entre campanhas considerado, apresentando assim um valor único de taxa de variação anual para todas as singularidades. A informação relativa ao diagrama de caixa está presente no Quadro 5.14.

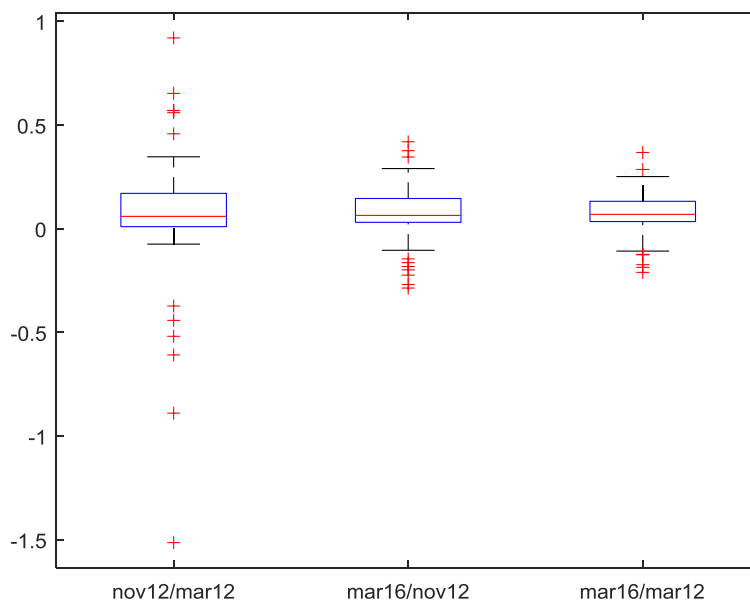


Figura 5.33 – Diagrama de caixa para todas as singularidades

Fazendo a comparação entre a informação obtida para cada singularidade e o caso em que se considera todas as singularidades, observa-se que no segundo caso o valor da TVA é praticamente igual em todos os intervalos entre campanhas considerados, rondando entre 0,06 e 0,07 mm/ano.

Quadro 5.14 - Informação do diagrama de caixa considerando todas as singularidades (TVA em mm/ano)

	março de 2012 a novembro de 2012	novembro de 2012 a março de 2016	março de 2012 a março de 2016
Mediana	0,0600	0,0647	0,0699
Máximo	0,9206	0,4197	0,3682
Mínimo	-1,5136	-0,2857	-0,2101
Percentil 75	0,1710	0,1463	0,1327
Percentil 25	0,0104	-0,1036	-0,1075
Nº. de Outliers	12	10	8
Nº. de pontos	85		

5.5 Síntese da análise de resultados

Em virtude de condensar a análise de resultados realizada nos subcapítulos anteriores, elaborou-se o Quadro 5.15.

Quadro 5.15 – Síntese da análise de resultados

Variável estudada		Observações relevantes
Velocidade de circulação		A avaliação dos parâmetros geométricos está relacionada com as diferentes velocidades. De todo o troço cerca de 95,7% têm uma velocidade nas gamas de 80 a 120 km/h e 120 e 160 km/h.
Desvio Padrão acima do LA	LL _{D1}	Localização assinalada no mapa acima do valor limite de tolerância de alerta conforme as gamas de velocidade.
	AL _{D1}	
Função de Distribuição acumulada	LL _{D1}	Cerca de 15 a 20% do troço está acima do LA para velocidades entre 80 e 120 km/h e, 0 a 1% para velocidades entre 120 e 160 km/h. Permite qualificar e quantificar a via segundo as classes de qualidade de via.
	AL _{D1}	Cerca de 15 a 20% do troço está acima do LA para velocidades entre 80 e 120 km/h e, 20 a 25% para velocidades entre 120 e 160 km/h. Permite qualificar e quantificar a via segundo as classes de qualidade de via.
Classe de Qualidade Geométrica de Via	LL _{D1}	Nas gamas de velocidades mais representativas é possível verificar que todas as classes de qualidade de via têm percentagens semelhantes. É possível criar mapas com a indicação da classe de qualidade de via em cada ponto.
	AL _{D1}	
Desvio Padrão	Troço escolhido da Via-férrea	Tem-se uma melhor perceção do desenvolvimento da via quando se calcula o desvio padrão para uma janela móvel. Os defeitos são evidenciados quando as janelas são de intervalos menores. A média do valor médio do desvio padrão diminui quando a velocidade é maior e aumenta com o passar do tempo.
	Singularidades	O valor médio do desvio padrão das singularidades é maioritariamente superior à média do valor do desvio padrão para todo o troço.

TVA	Troço escolhido da Via-férrea	Determinadas 3 taxas de variação anual, consoante as campanhas; o seu valor é elevado no início e estabiliza ao longo do tempo.
	Singularidades	O valor da taxa de variação anual é superior ao valor da TVA para o troço da via-férrea escolhido.

Capítulo 6

6. Conclusões e Desenvolvimentos futuros

6.1 Conclusões

A realização de inspeções à via-férrea, incluindo a auscultação da sua geometria, é uma atividade fundamental para as gestoras de infraestruturas ferroviárias pois, indiretamente permite avaliar se a circulação sobre a via pode ser feita em segurança pelo material circulante; se a interação dinâmica entre veículos e a via não provoca degradação prematura dos componentes dos mesmos e se os níveis de conforto são os adequados para os passageiros. Para além da identificação de inconformidade nos diversos parâmetros, têm como objetivo prever situações, possibilitando assim uma manutenção preventiva na via-férrea.

Contudo, é prática comum suportar o planeamento de ações de manutenção com base na observação da condição da infraestrutura, por exemplo recorrendo a inspeções visuais e a veículos de auscultação da geometria da via-férrea. Apesar de esta abordagem tradicional de avaliação da condição da via-férrea ser bastante eficaz na identificação de locais que afetam negativamente o desempenho funcional e estrutural, na generalidade ela não permite obter informação útil sobre as causas que conduziram a essa redução de desempenho.

Consequentemente, o planeamento das ações de manutenção tende a apresentar uma vertente mais corretiva e menos preventiva e preditiva, sem contemplar abordagens mecanicistas, o que condiciona negativamente a eficiência da gestão da infraestrutura.

Assim, o trabalho apresentado nesta dissertação visou contrariar esta prática, apresentando e aplicando a um caso de estudo, métodos e ferramentas mais complexas e com maiores potencialidades do que aquelas usualmente utilizadas na análise corrente da informação produzida por veículos de auscultação.

Na realização das inspeções são tidos em conta cinco parâmetros geométricos principais: bitola, empeno, alinhamento longitudinal, nivelamento longitudinal e nivelamento transversal,

dos quais têm de estar abaixo dos valores limite estabelecidos pelas normas, consoante o valor da bitola da via-férrea; os valores limite para cada um dos parâmetros estão definidos na IT.VIA.018 e na EN 13848, conforme a gama de velocidades praticada.

Os parâmetros geométricos analisados podem ser baseados no valor do defeito ou então através do desvio padrão do defeito para cada parâmetro. No caso do nivelamento longitudinal e do alinhamento, a EN 13848-5 estabelece os valores de referência para definição dos limites de alerta para o valor médio do desvio padrão; A IT.VIA.018 adota como valores limite de tolerância de alerta, os valores do limite superior de cada intervalo, o que faz que com os casos a considerar não tenham uma tolerância de alerta tão apertada.

Os níveis de qualidade da via já possuíram diferentes métodos de classificação da via, sendo atualmente baseada em dois dos principais parâmetros: o nivelamento longitudinal D1 e o alinhamento D1, onde conforme a gama de velocidades praticada e para o intervalo de desvio padrão dos parâmetros, se classifica o seu nível de qualidade. A nível europeu, a forma de classificar a qualidade de via é através da classificação definida na EN 13848-6, onde é atribuído uma classe de acordo com os valores limite do desvio padrão do nivelamento longitudinal e do alinhamento e, conforme a gama de velocidades.

Para realizar as inspeções à via em Portugal existem vários equipamentos, sendo o VIV-EM120 da Infraestruturas de Portugal, S.A, um dos que permite avaliar os diversos parâmetros de geometria de via em carga, com níveis próximos daqueles aplicados por material circulante adotando a sua velocidade de acordo com o permitido na via e, regista os dados referentes aos parâmetros geométricos.

De uma forma geral, são apresentadas as metodologias que são aplicadas hoje em dia e a metodologia que se propõe com os vários melhoramentos a serem possivelmente aplicados, preocupam-se em perceber a causa do defeito e não apenas em corrigir esse mesmo defeito. A metodologia aplicada é suportada nas normas europeias que tem uma visão mais qualitativa da via, o que pode levar a resultados distintos do que a metodologia existente conclui.

Para implementar a metodologia proposta selecionou-se um troço da via-férrea onde não foram realizadas intervenções relevantes durante os últimos anos, por forma a não alterar a evolução gradual da mesma. O troço escolhido tem cerca de 50 km de extensão, com elementos distintos ao longo da via e atravessa cerca de 92 singularidades de vários tipos, como por exemplo, pontes, túneis, alterações bruscas da configuração da superestrutura entre outros.

Recorre-se a ferramentas desenvolvidas em ambiente MATLAB para definir a localização dos vários pontos registados, facilitando assim a identificação dos mesmos no terreno, de acordo com o parâmetro pretendido, existindo uma programação já definida para esse efeito, sendo a sua utilização uma mais-valia.

Tendo em conta, que os parâmetros geométricos dependem sempre da gama de velocidades que o comboio circula, de toda a extensão cerca de 95,7% têm as gamas de velocidades de 80 a 120 km/h e 120 a 160 km/h, sendo pouco representativas as outras gamas inferiores.

Relativamente, à avaliação do estado da via sobre o nível de alerta chegou-se à conclusão que para o valor médio do desvio padrão do nivelamento longitudinal D1 cerca de 15% a 20% estão acima dos limites para as velocidades entre 80 a 120 km/h e, de 0 a 1% na gama de velocidades seguinte; para o valor médio do desvio padrão do alinhamento D1 cerca de 15% a 20% estão acima dos limites para as velocidades entre 80 a 120 km/h e, de 20 a 25% na gama de velocidades superior.

Quanto às classes de qualidade de via, de acordo com a classificação proposta na EN 13848-6, pode concluir-se que as percentagens determinadas para cada classe têm aproximadamente o mesmo valor para as duas gamas de velocidades consideradas mais representativas do caso de estudo, tanto para o nivelamento longitudinal, como para o alinhamento.

Relativamente ao cálculo do desvio padrão decidiu-se utilizar o método em que são consideradas janelas móveis - neste caso, janelas móveis de 200 m - pois no caso em que são consideradas janelas “fixas”, temos a perda de informação sobre o desenvolvimento entre esses dois pontos. Assim sendo, existe uma melhor perceção do que se vai registando ao longo dos 200 m.

Aquando do cálculo do desvio padrão relativamente às singularidades houve o cuidado de seleccionar os Pk's onde todas as singularidades estavam inseridas; assim, o desvio padrão é calculado apenas tendo em conta os valores do defeito nas singularidades.

Ao fazer a comparação entre a média do valor médio do desvio padrão de todo o troço com o valor obtido para cada singularidade, confirma-se, tal como esperado que, o seu valor nas singularidades é superior à média verificada ao longo da via. Esta constatação evidencia que a via-férrea se degrada mais rapidamente em locais associados a singularidades.

No cálculo das taxas de variação anual, os seus valores indicam que nos meses seguintes à campanha de março de 2012, a degradação da qualidade geométrica da via sofreu uma evolução mais rápida e que com o passar dos anos o ritmo começou a diminuir e, por sua vez a estabilizar – algo que é um comportamento característico destas infraestruturas. A evolução observada leva a supor que possa ter existido uma intervenção generalizada na via antes da campanha de março de 2012 que justifique a degradação mais acentuada no período imediatamente a seguir.

Dado que ao longo dos 50 km de extensão a via desenvolve-se de forma distinta, apontando para possíveis melhoramentos não registados, identificou-se um trecho onde demonstrava uma evolução gradual e esperada do seu desenvolvimento. O trecho possui cerca de 1/3 da extensão total do troço escolhido, cerca de 13 km e verifica-se novamente a evolução mais

rápida no início das campanhas e com tendência a estabilizar. Verifica-se, também, que nessa zona do troço existe uma menor densidade de singularidades na via.

Concluindo, a análise quanto à taxa de variação anual da via-férrea nas singularidades evidenciou um valor superior à taxa de variação anual relativa a toda a extensão da via-férrea do troço em estudo. Em parte, este comportamento era expectável e suporta a ideia de que as singularidades da via-férrea são locais críticos deste sistema ferroviário que fortemente condicionam o seu desempenho a longo prazo, diminuem a qualidade de serviço e acarretam custos significativos para as gestoras das infraestruturas ferroviárias. Assim, visando minimizar estes aspetos negativos, as singularidades de via, nas suas diversas formas, deverão ser dimensionadas e construídas de uma forma mais cuidada e preferencialmente deverão ser enquadradas num sistema de monitorização dedicado, no âmbito dos procedimentos de gestão de ativos.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Como desenvolvimentos futuros propõe-se alargar a metodologia apresentada aos restantes parâmetros geométricos; uma vez que a via só estará bem caracterizada se forem avaliados todos os parâmetros em conjunto, contribuindo assim para uma melhor compreensão do comportamento de degradação da via e obtenção de informação relevante que suporta as atividades de manutenção preventiva, relacionando as causas e os seus efeitos.

Uma vez que existem normas que permitem uniformizar os procedimentos entre países, seria proveitoso utilizar correntemente essas mesmas normas para se poder classificar a qualidade geométrica das linhas portuguesas relativamente às restantes linhas existentes na Europa.

Tendo em conta os obstáculos encontrados na elaboração da metodologia proposta, é de salientar que ao serem realizadas novas inspeções se tenha o cuidado de iniciar sempre a inspeção no exato local da anterior pois embora todos os pontos estejam representados geograficamente segundo as coordenadas latitude e longitude, existem sempre erros; por exemplo, na execução de gráficos de desvio padrão teve de se realizar um acerto considerando a primeira campanha como referência, para que todas as outras tivessem o mesmo desenvolvimento.

Outro ponto a salientar é o fato de que nos relatórios de trabalho que foram disponibilizados estarem indicadas apenas algumas singularidades presentes na via mas a localização das mesmas não era precisas e em alguns casos verificaram-se erros de posicionamento de cerca de 100 metros. No caso em estudo, como não existiam dados suficientes acerca das passagens hidráulicas, pois as imagens de satélite da plataforma do “Google maps” não têm detalhe suficiente nem está disponível o modo “Street View”, era difícil a sua identificação,

estas não foram consideradas. Assim, propõe-se que seja tomado em consideração a localização exata de cada singularidade, anotando o início e o fim da mesma.

Um outro fator que pode ser tomado em conta, é o fato de se analisarem campanhas considerando as mesmas estações do ano, visto que alguns estudos sugerem que o teor em água das camadas de apoio da infraestrutura afeta o comportamento resiliente da via quando carregada – e, assim poderá ser interessante realizar-se um estudo confrontando os valores de precipitação verificados anteriormente à data de cada campanha de auscultação e averiguar a influência desse fator nos dados de auscultação da geometria.

O fato de serem realizadas intervenções na via, apenas as de maior relevância são anotadas e, tidas em conta nos relatórios; contudo, e para não criar falsas interpretações acerca dos resultados obtidos aquando das inspeções, é importante registar qualquer tipo de manutenção feita na via-férrea, tais como o ataque manual e localizado da camada de balastro.

Ao realizar uma análise à via-férrea, torna-se fácil de interpretar os resultados quando se é feita uma avaliação baseada no cálculo do desvio padrão, para isso é de sublinhar a consideração de janelas móveis para o seu cálculo; uma vez que, facilita a sua interpretação no desenvolvimento ao longo da via e permite obter informação mais detalhada.

Um outro fator, que pode ser tido em conta, é o fato de usar janelas móveis mais pequenas, pois vai fazer com que eventuais defeitos localizados junto das singularidades de via possam ser evidenciados. Este tipo de abordagem poderá ser enquadrado num sistema de monitorização de singularidades, avaliando e comparando a evolução de um ou mais parâmetros de geometria de via nesse local e detetando evoluções anómalas.

Para tornar uma avaliação à via-férrea mais homogénea e, visto que todos os parâmetros têm os seus valores limite consoante a velocidade praticada, há que considerar a avaliação onde o troço a ser estudado tenha aproximadamente a mesma extensão para as diferentes gamas de velocidade definidas nas normas.

Por fim, propõe-se que seja determinada a taxa de variação anual consoante a gama de velocidades, quer para toda a extensão da linha férrea quer apenas para as zonas onde se encontram as singularidades.

Referências Bibliográficas

Aribau, S. (2004). *“Una Nueva Problemática: La renovación de líneas en Alta Velocidad”*. Tese final de carreira. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Baldeiras, M. (2008) – *Monitorização de Infraestruturas ferroviárias* – Curso de formação em Engenharia Ferroviária FUNDEC, Lisboa.

Cerdeiral, J. (2014) *Influência da subestrutura na Evolução da degradação da Qualidade geométrica da via-férrea*. Tese de Mestrado; Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Dantas, R. (2014). *Modelo de Gestão de Ativos da via-férrea baseado em análise probabilística de Custos por Ciclo de Vida*. Aplicação ao caso da Rede Ferroviária Nacional. Tese de Mestrado. Lisboa: Instituto Superior Técnico de Lisboa.

CEN (2010) EN 13848-5: *Railway applications - Track - Track geometry quality - Part 5: Geometric quality levels - Plain line*. Abril de 2010

CEN (2013) EN 13848-6: *Railway applications - Track - Track geometry quality - Part 6: Characterisation of track geometry quality*. Outubro de 2013

Esveld, C. (2001) *Modern Railway Track*; 2nd ed., MRT Productions, Zaltbommel, ISBN: 90-800324-3-3.

Fontul, S. (2015). *Sebenta das aulas da disciplina de Infraestruturas Ferroviárias e Portuárias*. Lisboa: Faculdade Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Fortunato, E. (2005). *Renovação de Plataformas Ferroviárias. Estudo Relativos à Capacidade de Carga*. Tese de Doutoramento. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Fortunato, E.; Fontul, S.; Chiara, F.; Burrinha, R.; Baldeiras, M. (2016). *Caracterização da via-férrea com georadar. Avaliação de propriedades dielétricas dos materiais*. Lisboa: Centro Rodoviário Português/ Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

IT.VIA.018 (2009). *Tolerâncias dos parâmetros geométricos da via*. Rede Ferroviária Nacional – REFER, EPE

Lopes, A. M. (2013). *Avaliação da degradação de vias férreas. Caracterização do balastro com recurso ao Radar de Prospeção*. Tese de Mestrado. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

MATLAB (2016). *MATLAB R2016a*. MathWorks

Paixão, A. e Fortunato, E. (2009). *Novas soluções de superestrutura de via para a alta velocidade, Comparação com a via balastrada tradicional*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Paixão, A. (2014). *Transition Zones in Railway Tracks. An experimental and numerical study on the structural behavior*. Tese de Doutoramento. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Paixão, A. Fortunato, E. Calçada, R. (2016). *A contribution for integrated analysis of railway track performance at transition zones and other discontinuities. Construction and Building Materials*; 111, 699-709; doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.126

REFER (2001). VIV02 (EM 120) - Veículo de inspeção de via. Descrição dos sistemas de medição. Diagnóstico e Qualidade da Via, Novembro 2001.

Rodrigues, D. (2012) *Manutenção e conservação de vias férreas: análise de casos práticos*. Tese de Mestrado. Coimbra: Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

Silva, T. (2012). *Inspeção e Reabilitação de Infraestruturas Ferroviárias*. Tese de Mestrado. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa.

Teixeira, P. (2008) *Curso de Especialização em Alta Velocidade Ferroviária, Bloco 3: Manutenção da Infraestrutura*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.

Ubalde, L. (2004) *La auscultación y los trabajos de vía en la línea del AVE Madrid – Sevilla: análisis de la experiencia y deducción de nuevos criterios de mantenimiento*; Tese de Doutoramento. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

UIC (2008) *CODE 719 R, Earthworks and track bed for railway lines*; Paris: Union Internationale des Chemins de Fer; 2-7461-0568-3.

Anexo A

A. Localização de singularidades

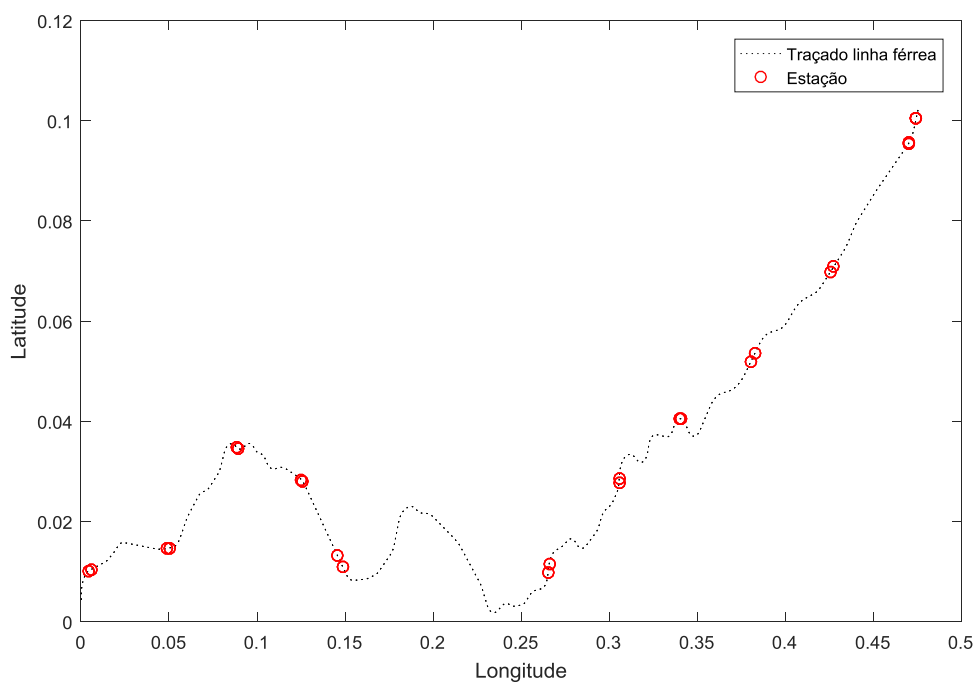


Figura A.1 – Localização de estações

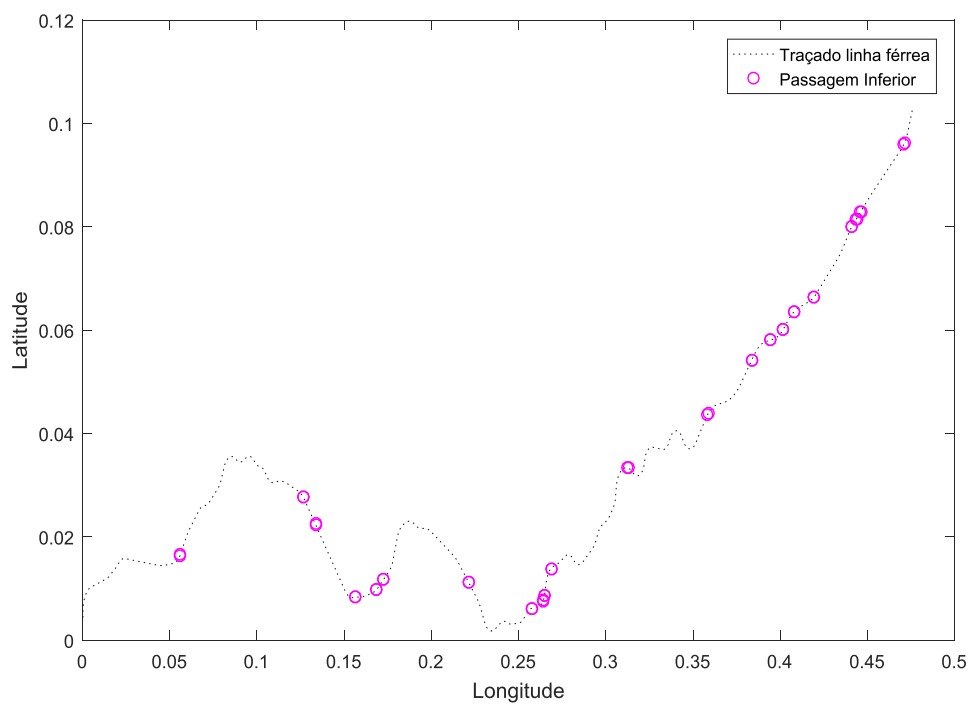


Figura A.2 – Localização de passagens inferiores

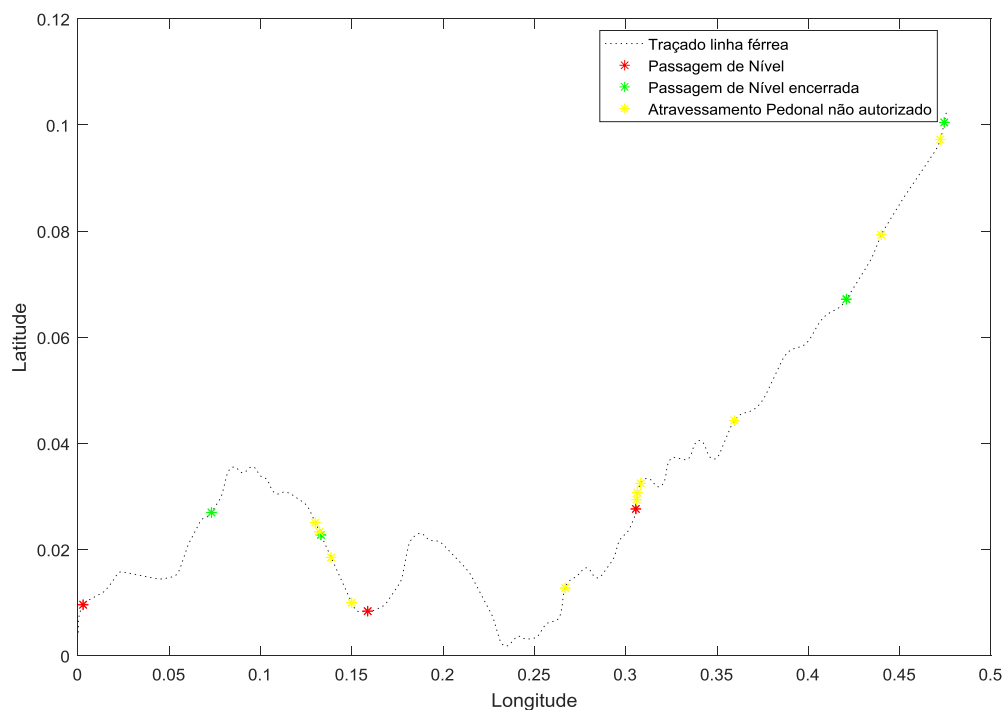


Figura A.3 – Localização de passagens de nível abertas ao trânsito e encerradas e atravessamentos pedonais não autorizados

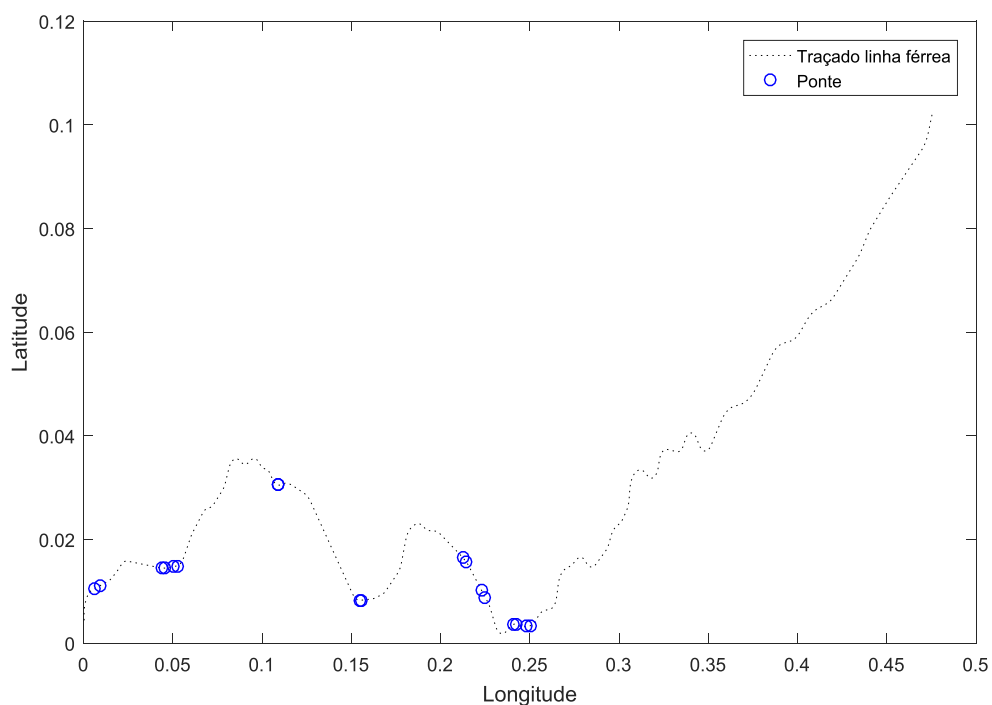


Figura A.4 – Localização de pontes

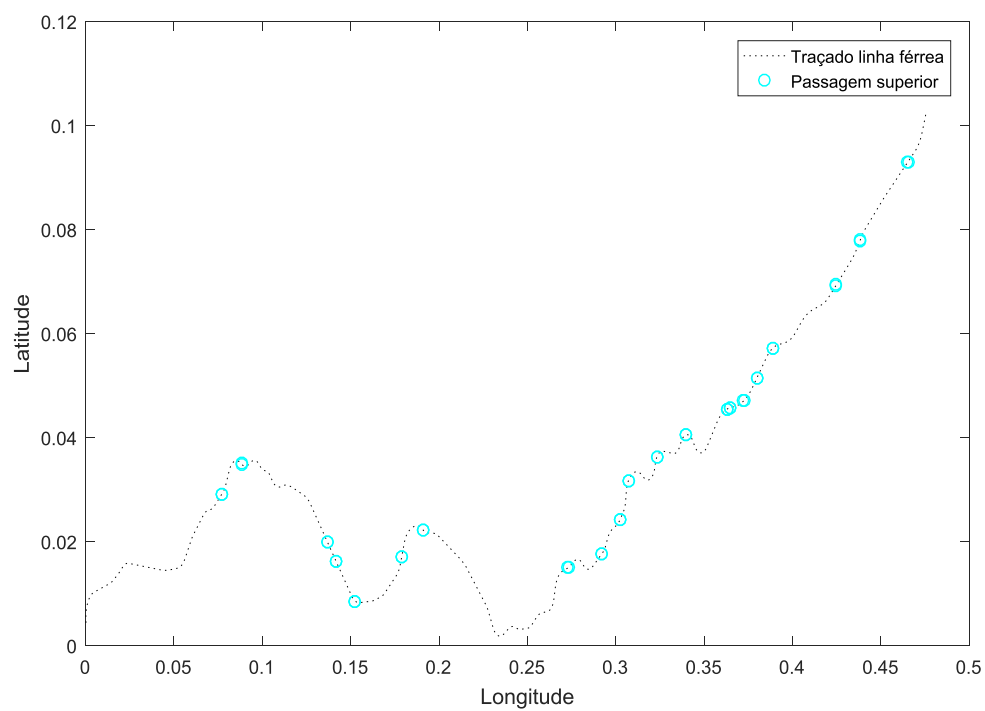


Figura A.5 – Localização de passagens superiores

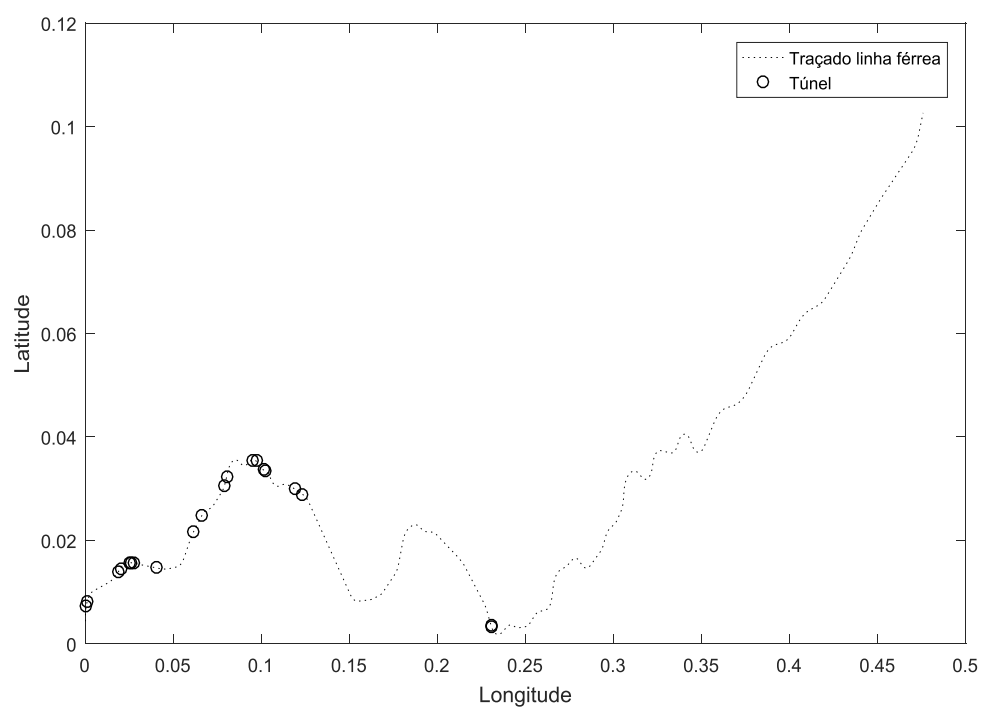


Figura A.6 – Localização de túneis

Anexo B

B. Gráficos de comparação entre primeira e última campanha dos parâmetros geométricos

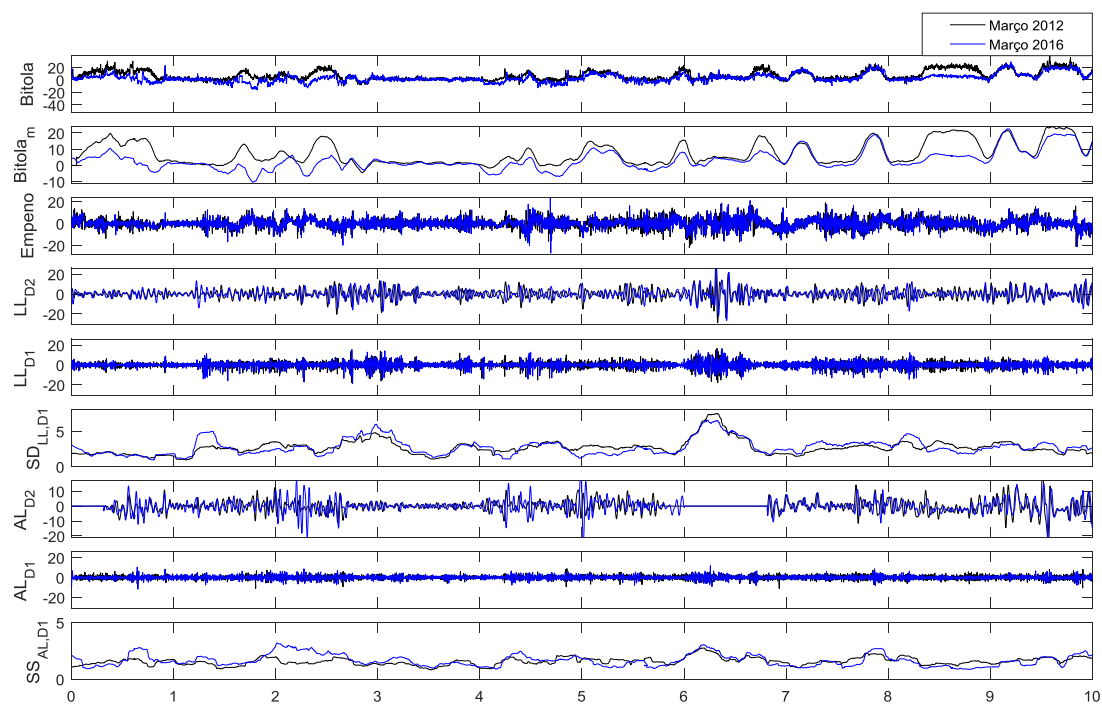


Figura B.1 - Parâmetros geométricos e desvio padrão do LL e AL entre o Pk 0 e Pk 10

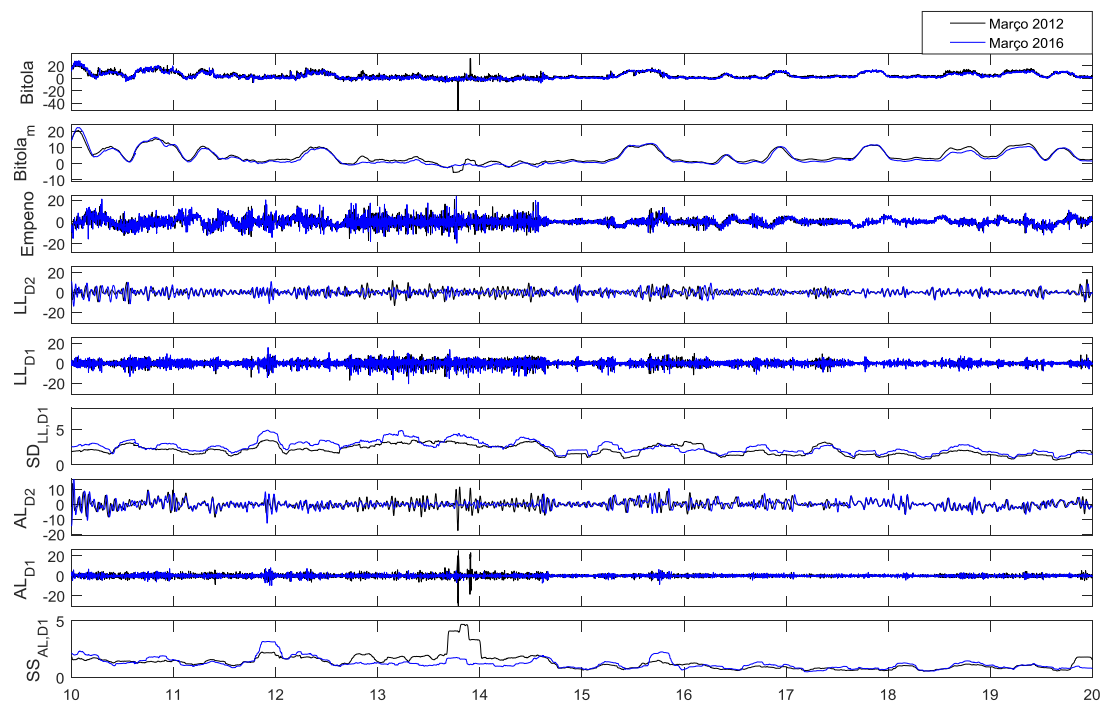


Figura B.2 - Parâmetros geométricos e desvio padrão do LL e AL entre o Pk 10 e Pk 20

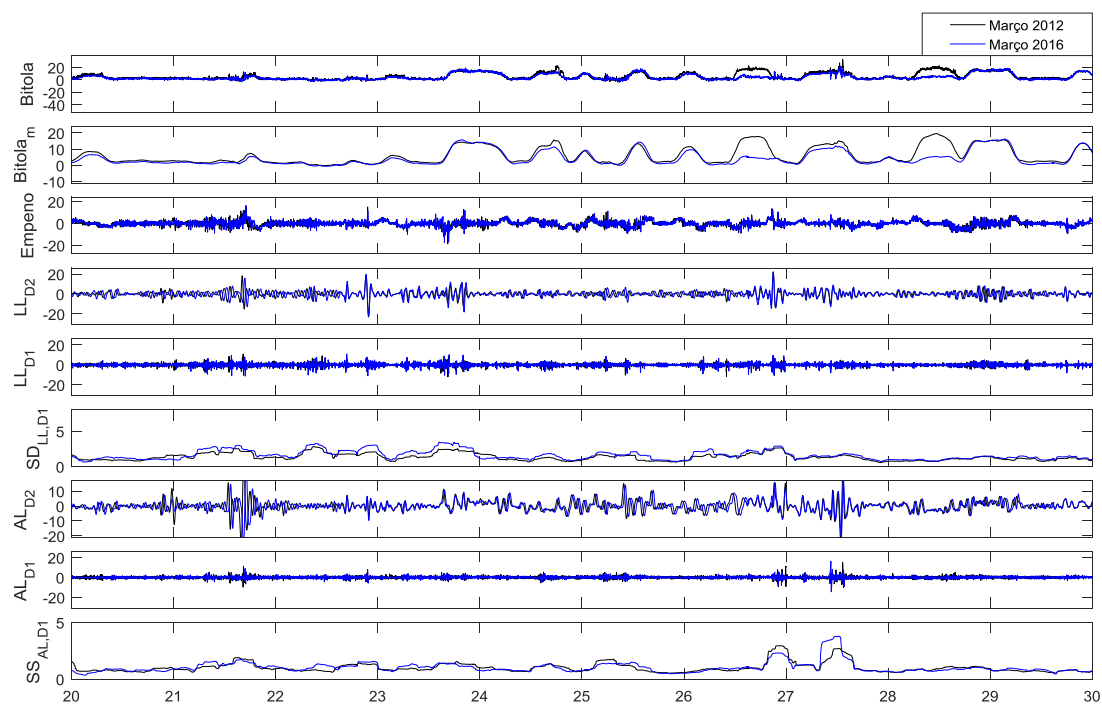


Figura B.3 - Parâmetros geométricos e desvio padrão do LL e AL entre o Pk 20 e Pk 30

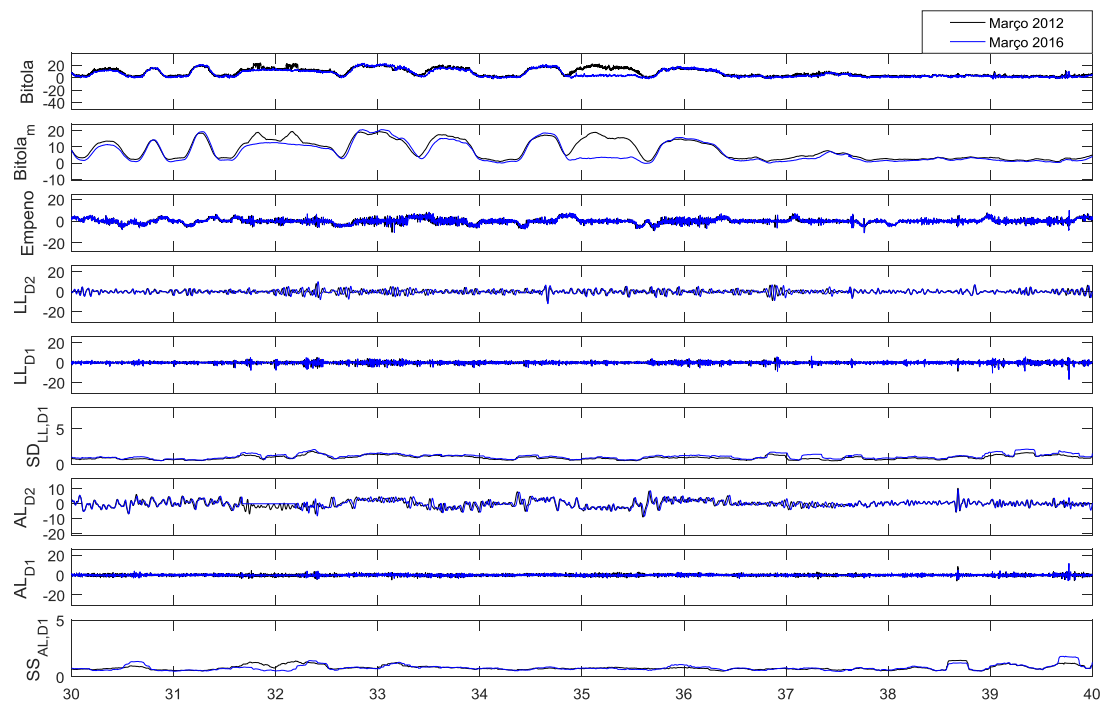


Figura B.4 - Parâmetros geométricos e desvio padrão do LL e AL entre o Pk 30 e Pk 40

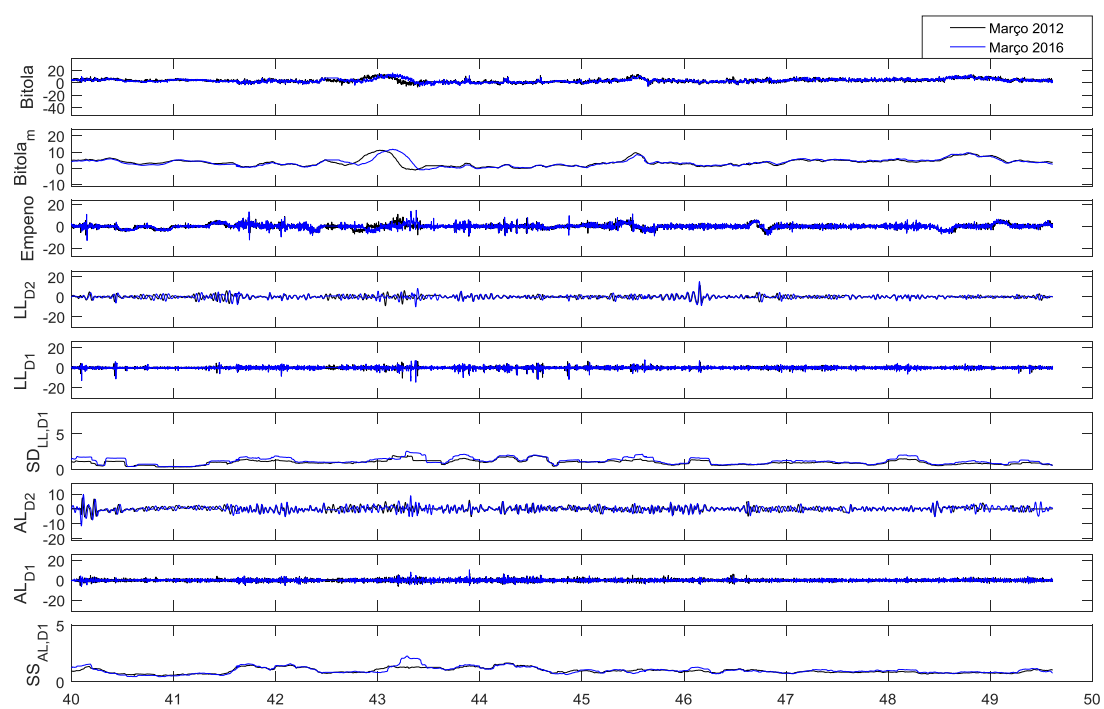


Figura B.5 - Parâmetros geométricos e desvio padrão do LL e AL entre o Pk 40 e Pk 50

Anexo C

C. Desvio padrão de LL_{D1}

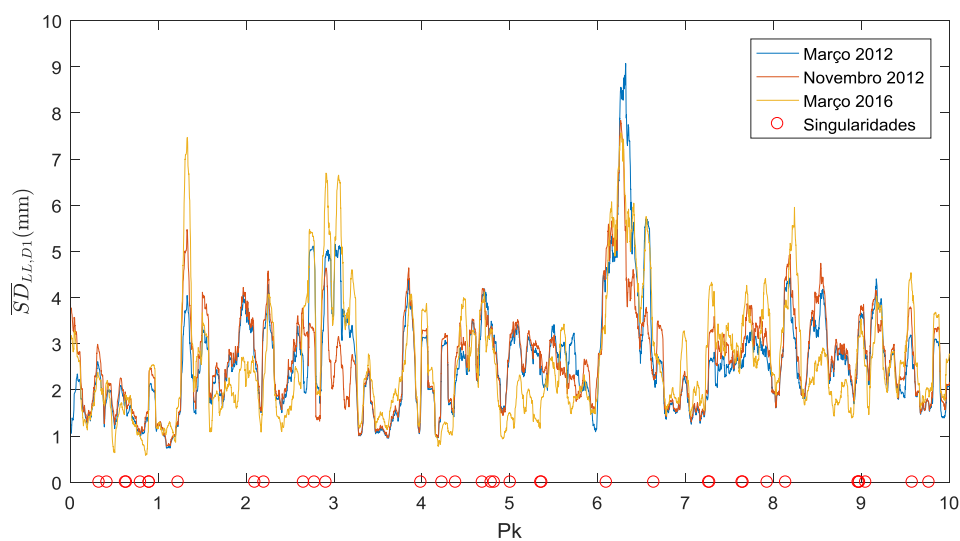


Figura C.1 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 0 e 10
(janela móvel de 75 metros)

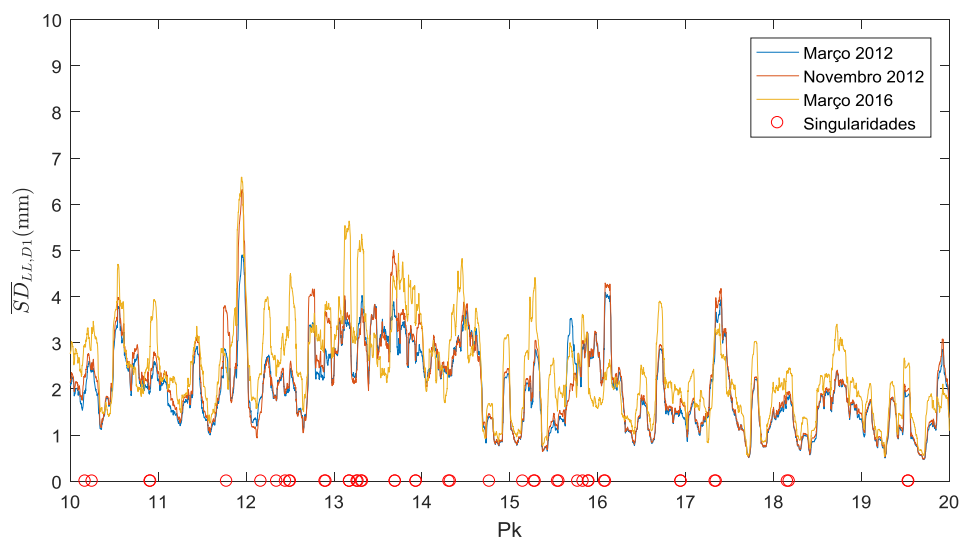


Figura C.2 – Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 10 e 20
(janela móvel de 75 metros)

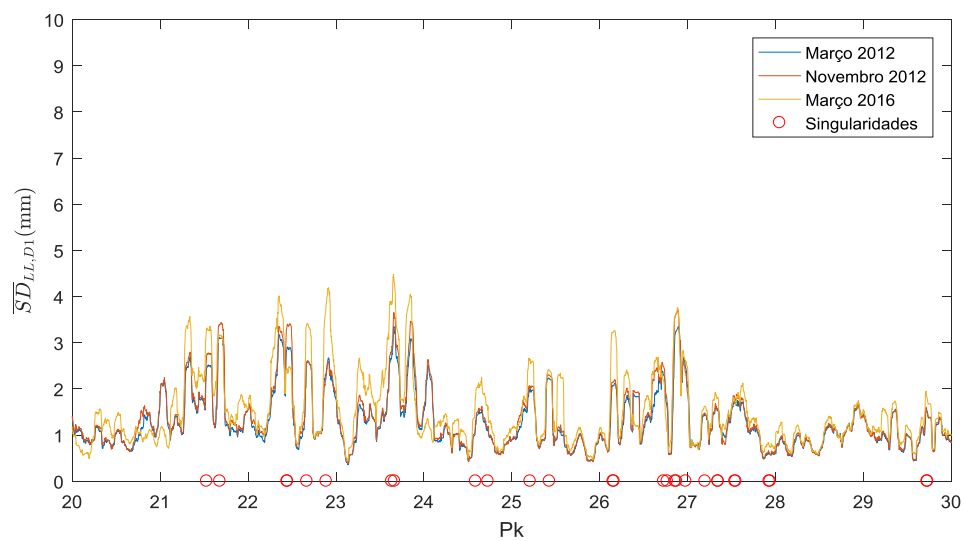


Figura C.3 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 20 e 30
(janela móvel de 75 metros)

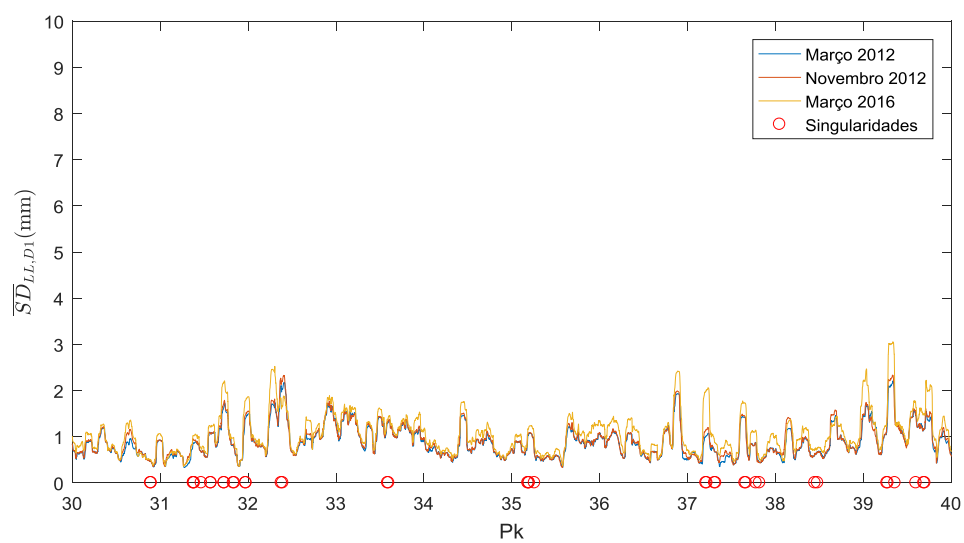


Figura C.4 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 30 e 40
(janela móvel de 75 metros)

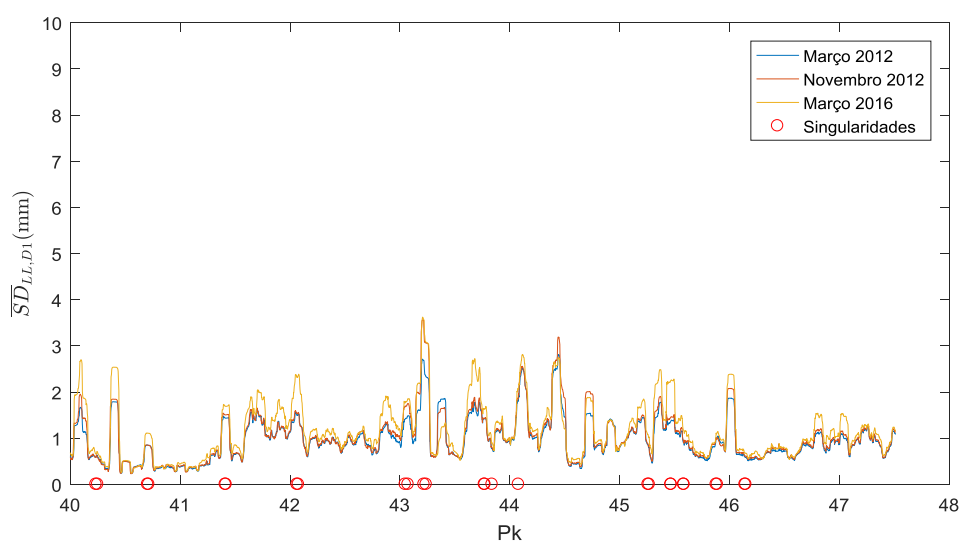


Figura C.5 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 40 e 50
(janela móvel de 75 metros)

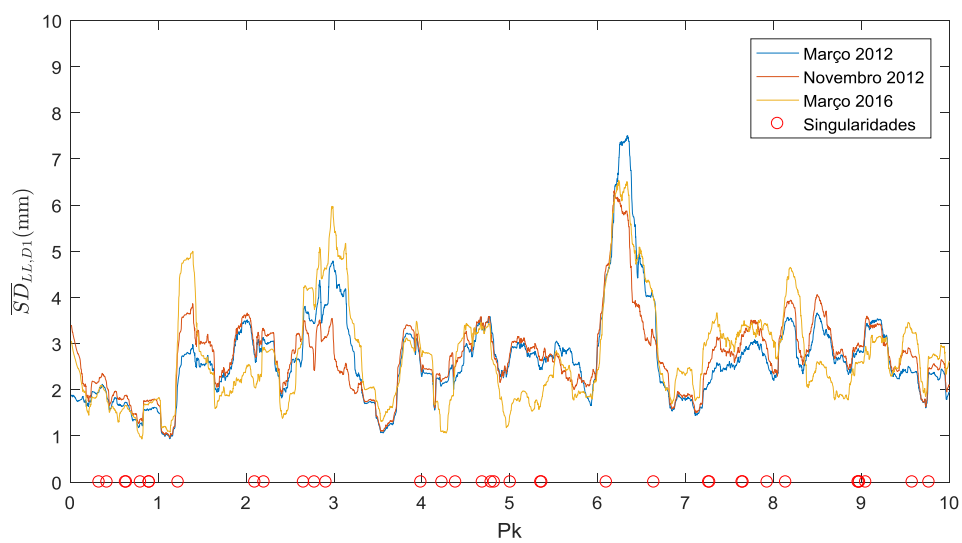


Figura C.6 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 0 e Pk 10
(janela móvel de 200 metros)

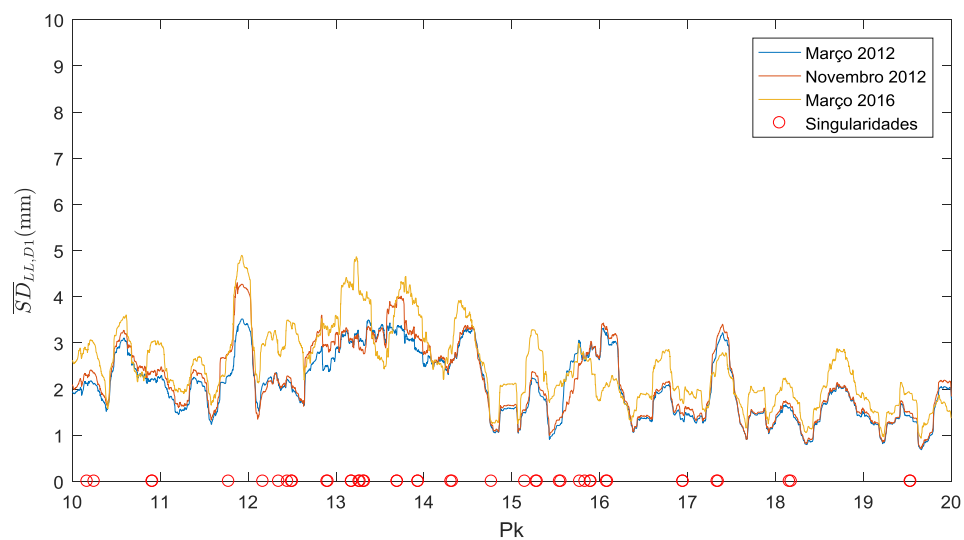


Figura C.7 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 10 e Pk 20
(janela móvel de 200 metros)

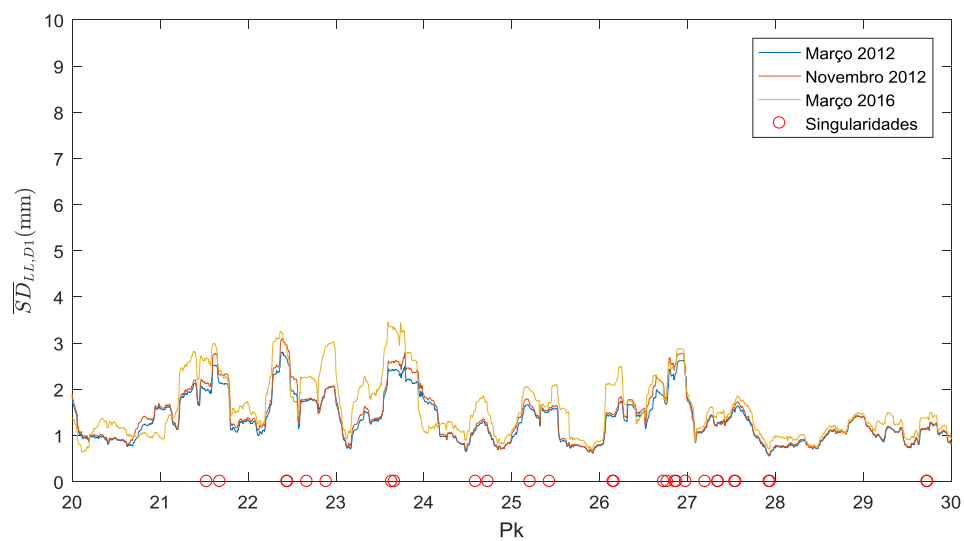


Figura C.8 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 20 e Pk 30
(janela móvel de 200 metros)

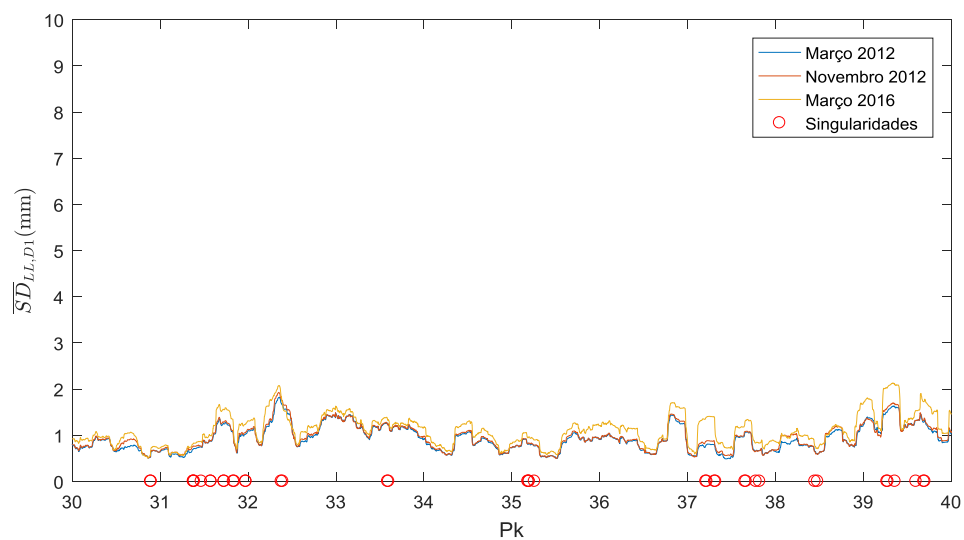


Figura C.9 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 30 e Pk 40
(janela móvel de 200 metros)

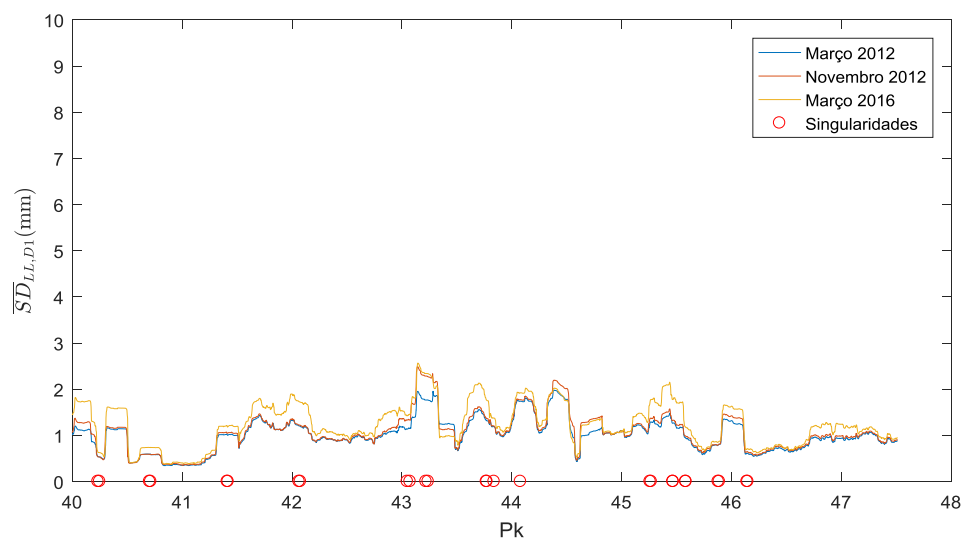


Figura C.10 - Desvio padrão do LL_{D1} para as três campanhas entre o Pk 40 e Pk 48
(janela móvel de 200 metros)

Anexo D

D. Taxas de variação anual

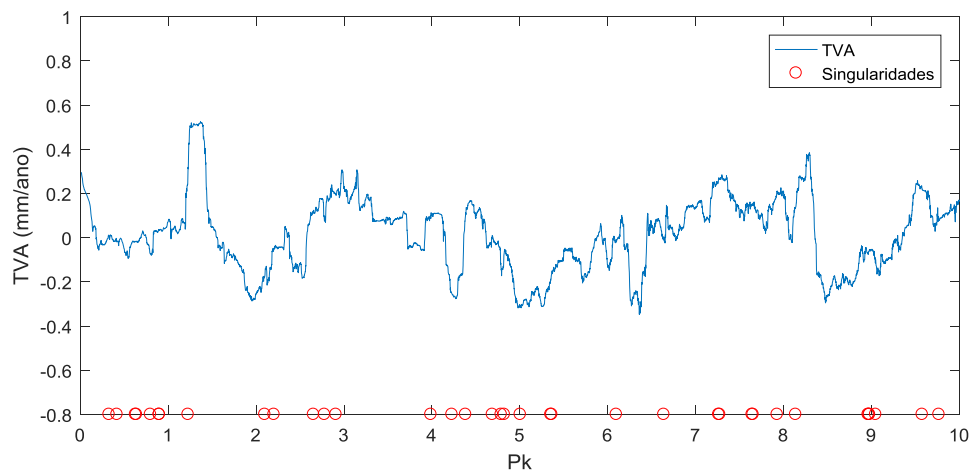


Figura D.1 – Taxa de variação anual entre março de 2012 e março de 2016
(entre o Pk 0 e Pk 10)

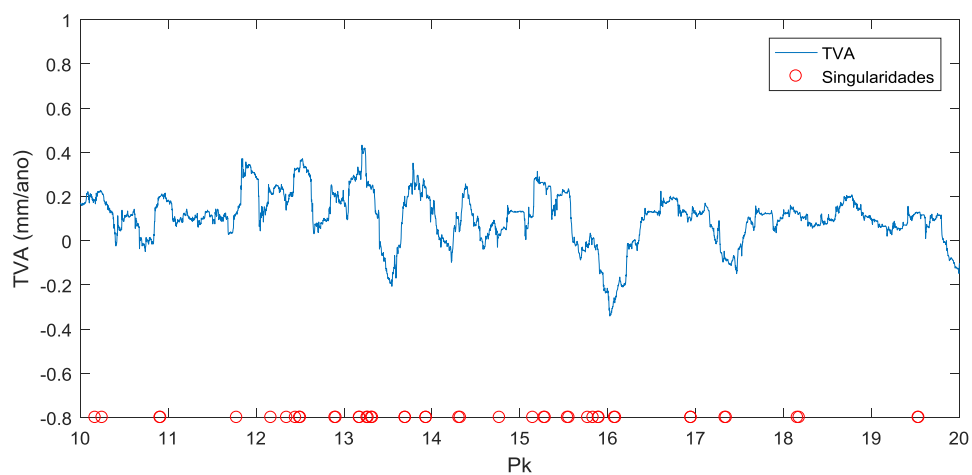


Figura D.2 – Taxa de variação anual entre março de 2012 e março de 2016
(entre o Pk 10 e Pk 20)

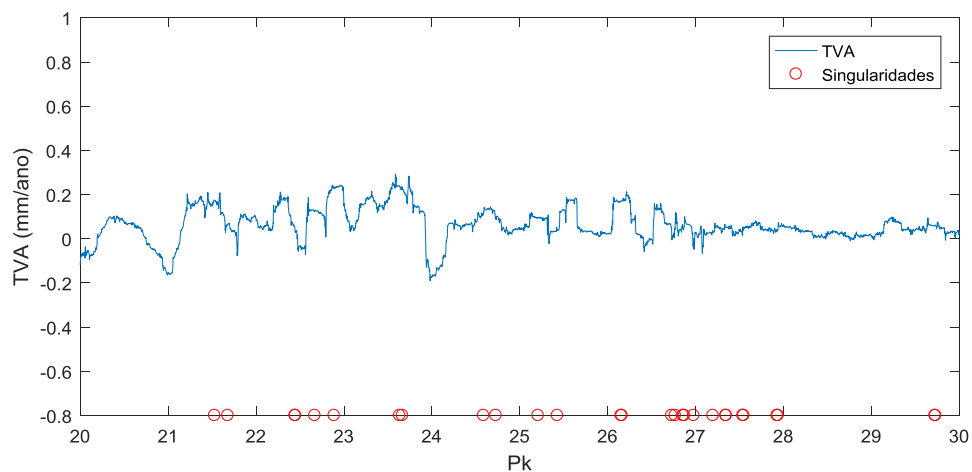


Figura D.3 – Taxa de variação anual entre março de 2012 e março de 2016
(entre o Pk 20 e Pk 30)

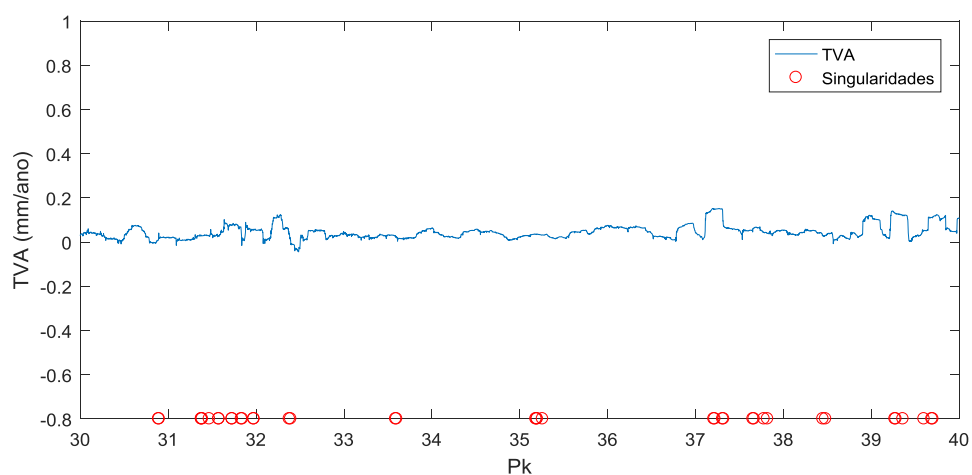


Figura D.4 – Taxa de variação anual entre março de 2012 e março de 2016
(entre o Pk 30 e Pk 40)

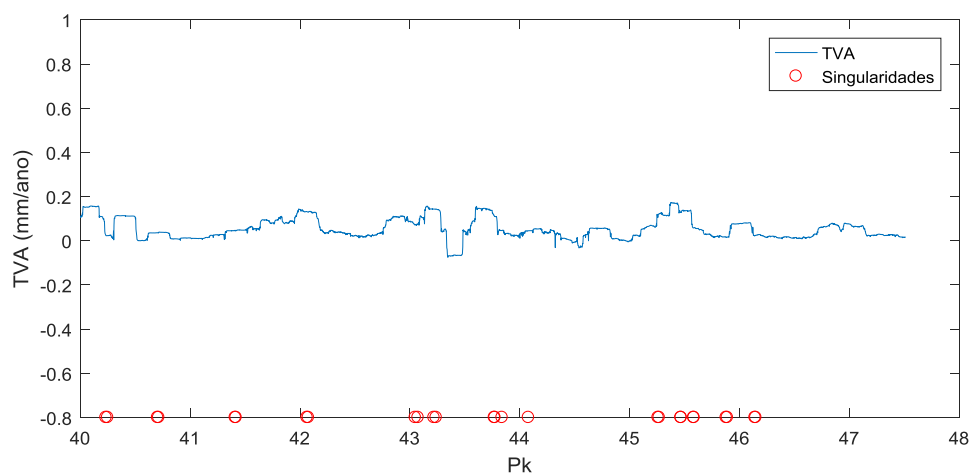


Figura D.5 – Taxa de variação anual entre março de 2012 e março de 2016
(entre o Pk 40 e Pk 48)